



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# IDENTIFIKACE TEPELNÉ VODIVOSTI A TEPELNÉ KAPACITY STAVEBNÍCH LÁTEK METODOU „HOT WIRE METHOD“

IDENTIFICATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL CAPACITY OF BUILDING MATERIALS BY THE "HOT WIRE METHOD"

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Průša

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK,  
CSc., Ph.D.

BRNO 2019



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. David Průša
<b>Název</b>	Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“
<b>Vedoucí práce</b>	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2018
<b>Datum odevzdání</b>	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

1. Šťastník, S., Vala, J., Kmínová, H. Identification of basic thermal technical characteristics of building materials, *Kybernetika* 42, Praha 2007
2. Vala, J., Šťastník, S. On the thermal stability in dwelling structures. *Building Research Journal* 52/1, Bratislava 2004, 31-56.
3. Davies M.G., *Building Heat Transfer*, John Wiley & Sons, 2004
4. Bogoslovskij, V.N., *Stroitel'naja teplofizika*, Vysšaja škola Moskva 1982
5. Halahyja, M., *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*, Alfa Bratislava 1985
6. Isakov V., *Inverse Problems for Partial Differential Equations*, Applied Mathematical Sciences (Springer-Verlag), Vol 127, 2nd ed., 2006

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro identifikaci tepelně technických vlastností stavebních materiálů se používá řada fyzikálních metod, z nichž metoda horkého drátu je rychlou metodou, které lze využít i při měření v průběhu změny stavu zkoušeného materiálu. Dosud však chybí pro tuto metodu efektivní a spolehlivá metoda pro zjištění hledaných fyzikálních veličin.

V rámci diplomové práce proveďte:

- i) klasifikaci stavebních materiálů z hlediska jejich tepelně technických vlastností,
  - ii) sestavte přehled metod pro měření tepelně technických materiálových charakteristik,
  - iii) navrhnete postup měření nestacionární metodou pro zjištění tepelně technických veličin stavebních materiálů,
  - iv) na základě poznatků z provedených zkoušek na stavebních materiálech proveďte odhad nepřesnosti měření použité metody,
  - v) ověřte využitelnost dosavadních poznatků o materiálové identifikaci pro širší třídu staviv.
- Při vypracování diplomové práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; požadovaný rozsah diplomové práce 70 stran včetně tabulek a grafů

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je studie mechanismů šíření tepla a popis fyzikálních jevů, které provází nestacionární měření tepelných charakteristik metodou „hot-wire method“.

Zejména zde pozorujeme součinitel tepelné vodivosti a jeho závislost na různých veličinách jako například na teplotě měřeného vzorku, jeho vlhkostním stavu, na objemové hmotnosti vzorku a v neposlední řadě na jeho pórovitosti.

Uvedených poznatků je dále využito k návrhu konstrukce měřicího ústrojí nestacionárního měřidla, které vychází z regulárního ohřevu a věnuje se měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity metodou „hot-wire method“.

V poslední části práce je ověřena funkčnost navrhovaného měřicího ústrojí, je zde ověřena vhodnost vytvořeného algoritmu pro zpracování naměřených údajů a vyhodnocení výsledků, byla tedy ověřena reprodukovatelnost měření a byly porovnány naměřené výsledky metodami měření, které se běžně využívají a jsou zde dále ověřeny poznatky týkající se vlivu vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Nestacionární tepelný tok, tepelná vodivost, součinitel tepelné vodivosti, tepelná kapacita, metoda horkého drátu, tepelný tok, sdílení tepelné energie

## ABSTRACT

This aim of task deals with study of heat dissipation mechanisms and the description of physical phenomena, which is accompanied by non-stationary measurement of thermal characteristics by the method "hot-wire method". In particular, we observe the coefficient of thermal conductivity and its dependence on various variables such as the temperature of the measured sample, its moisture state, the volume of the sample and its porosity.

The above mentioned findings are used for the invention of the measuring device of a nonstationary gauge, which is based on regular heating and is dedicated to measuring the thermal conductivity coefficient and the heat capacity by the "hot-wire method" method.

In the last part of the thesis is verified functionality of the proposed measuring device, the suitability of the created algorithm for the processing of the measured data and the evaluation of the results was verified. The reproducibility of the measurements was verified and the measured results were compared with the measurement methods, which are commonly used. the influence of humidity on the coefficient of thermal conductivity.

## KEYWORDS

Nonstationary heat flux, thermal conductivity, coefficient of thermal conductivity, thermal capacity, hot wire method, heat flux, heat energy sharing

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2019

---

Bc. David Průša  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2019

---

Bc. David Průša  
autor práce

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc za důkladné vedení mé diplomové práce a za cenný čas, který mi vždy ochotně věnoval při konzultacích. Velké díky patří mé rodině a zejména babičce, Kateřině, Lucii, Michaele a Michalovi.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. David Průša *Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“*. Brno, 2019. 86 stran.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

## Obsah

Úvod do řešené problematiky .....	1
1 Teoretické poznatky o mechanizmech šíření tepelné energie .....	2
1.1 Mechanismy šíření tepelné energie .....	2
1.1.1 Šíření tepla vedením .....	3
1.1.2 Šíření tepla prouděním .....	6
1.1.3 Šíření tepla sáláním .....	7
1.2 Tepelné vlastnosti .....	9
1.2.1 Tepelná vodivost .....	9
1.2.1.1 Vliv hustoty, pórovitosti a objemové hmotnosti na tepelnou vodivost .....	11
1.2.1.2 Vliv teploty a vlhkosti na tepelnou vodivost .....	13
1.2.1.3 Vliv směru tepelného toku na tepelnou vodivost .....	16
1.2.1.4 Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost .....	17
1.2.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	18
1.2.1.6 Součinitel tepelné vodivosti ve výpočtu .....	18
1.2.1.6.1 Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti .....	19
1.2.1.6.2 Charakteristická hodnota součinitele tepelné vodivosti .....	19
1.2.1.6.3 Naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti .....	20
1.2.1.6.4 Návrhové hodnoty $\lambda$ dle informativní přílohy A ČSN 73 0540-3 .....	21
1.2.1.6.5 ČSN EN ISO 10 456 .....	22
1.2.2 Tepelná kapacita .....	22
1.2.3 Metody měření součinitele tepelné vodivosti .....	24
1.2.3.1 Stacionární metody měření součinitele tepelné vodivosti .....	24
1.2.3.1.1 Absolutní stacionární bez-zdrojové metody .....	24
1.2.3.1.1.1 Metoda desky .....	25
1.2.3.1.1.2 Metoda koule .....	26
1.2.3.1.1.3 Metoda válce .....	27
1.2.3.1.1.4 Metoda elipsoidu .....	27
1.2.3.1.2 Relativní stacionární bez-zdrojové metody .....	28
1.2.3.1.2.1 Metoda desky .....	28
1.2.3.1.2.2 Metoda koule .....	28
1.2.3.1.2.3 Metoda válců .....	29
1.2.3.1.2.4 Metoda tyčí .....	29
1.2.3.2 Nestacionární metody měření součinitele tepelné vodivosti .....	30
1.2.3.2.1 Nestacionární metody s konstantní počáteční metodou .....	31



1.2.3.2.1.1 Nestacionární metoda horkého drátu .....	32
1.2.3.2.1.2 Fitchova metoda .....	34
1.2.3.2.1.3 Novější metody měření pomocí přístroje ISOMET 2104 .....	35
2 Experimentální část – stanovení tepelných charakteristik metodou hot-wire experimentálním měřidlem s označením Kateřina .....	37
2.1 Měřicí přístroj s označením Kateřina.....	37
2.1.1 Řídicí ústrojí Raspberry Pi s kapacitním LCD.....	37
2.1.2 Operační systém pro Raspberry Pi 3 Raspbian.....	40
2.1.3 Platinové teplotní senzory .....	40
2.1.4 Měřicí sonda .....	44
2.2 Měřené materiály.....	49
2.2.1 Minerální izolační deska PURA .....	49
2.2.2 EPS Expandovaný polystyrén.....	53
2.2.3 CLIMA PLUS izolační deska .....	54
2.2.4 Konopná izolace.....	56
2.3 Způsob zpracování naměřených hodnot .....	57
2.4 Průběh měření.....	58
2.4.1 Konopná izolace.....	59
2.4.2 Pěnový polystyrén .....	60
2.5 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu vzorků .....	63
2.5.1 Minerální izolační deska PURA .....	64
2.5.2 CLIMA PLUS izolační deska .....	66
2.5.3 EPS 100S .....	69
2.5.4 EPS 50F .....	71
2.5.5 Pórobeton .....	73
2.6 Závěr .....	75

## Úvod do řešené problematiky

Nedílnou součástí projektování a výstavby budov je znalost tepelných charakteristik materiálů používaných u staveb. Tepelné charakteristiky materiálů jsou stále významnější pro kvalitní tepelné izolace budov a tím jsou na tyto charakteristiky kladeny nové nároky. Kvalitně tepelně izolovaná budova přináší značné snížení spotřeby energie potřebné pro vytápění a přispívá tak nepřímo k omezení spotřeby zdrojů tepla, jako jsou fosilní paliva, především zemního plynu, v menší rozsahu pak uhlí a je též snižována produkce skleníkových plynů. Přímo pak dochází k úspoře elektrické energie a tím ke snížení finančních nákladů vynaložených na vytápění.

Tato práce řeší problematiku tepelných fyzikálních veličin, zejména tepelnou vodivost vyjádřenou součinitelem tepelné vodivosti a tepelnou kapacitu.

Teoretická část práce se věnuje teorii mechanismů šíření tepla a jejich matematicko-fyzikálnímu vyjádření. Po uvedení do problematiky šíření tepelné energie je další část věnována tepelným veličinám, které popisují přenos tepelné energie, a to tepelné vodivosti, teplotní vodivosti, tepelné jímavosti, tepelné kapacity, tepelnému odporu atd. Zvláštní pozornost je věnována právě součiniteli tepelné vodivosti a jeho závislosti na teplotě, vlhkosti a objemové hmotnosti.

Následující část popisuje měření tepelné vodivosti za teplotně ustáleného i teplotně neustáleného stavu, přičemž je hlavní pozornost věnována nestacionární metodě měření tepelné vodivosti metodou „*hot-wire*“ a zároveň analyzuje trh s přípravky pro měření tepelné vodivosti. Tato část reprezentuje dosavadní informace v této oblasti, které jsou doplněny v praktické části o nové poznatky a řádnou kritiku.

Praktická část se zabývá vývojem nestacionárního měřidla součinitele tepelné vodivosti, které je kvalitativně vhodnou alternativou ke komerčně využívaným přístrojům při zachování nízkých výrobních finančních nákladů. Zároveň pak hledá vhodné matematické vyhodnocení naměřených dat tak, aby bylo dosaženo přesných hodnot a dále navrhuje postupy pro zpřesnění těchto výsledků.

# 1 Teoretické poznatky o mechanismech šíření tepelné energie

## 1.1 Mechanismy šíření tepelné energie

Základy teorie tepelně technických vlastností materiálů tvoří především zákony šíření tepla a migrace vlhkosti. Zákony charakterizují jejich určující veličiny, jejichž hodnoty se následně dále využívají při řešení tepelně technických a energetických problémů budov.

Šíření tepla (přenos tepelné energie) je termodynamický děj, nerovnoměrný, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase, a může nastat pouze třemi způsoby:

- vedením (kondukcí) - teplo přechází z teplejších míst tělesa na místa studenější, energii si vyměňují jen bezprostředně spolu sousedící částice,
- prouděním (konvencí) – teplo přenáší látky při svém proudění, což se projevuje jen v kapalinách a případně v plynech. Částice látky mění v prostoru svou polohu ve větším měřítku a nesou přitom svou energii s sebou,
- sáláním (radiací) – teplo se šíří z tělesa všemi směry ve formě elektromagnetického vlnění o jisté vlnové délce [1].

Mnohdy převažuje jeden mechanismus nad ostatními, pak můžeme při výpočtech, pro zjednodušení, brát v úvahu pouze dominantní mechanismus a podřadným mechanismům nepřihlížet. Pokud nelze předpokládat jediný dominantní mechanismus, musíme uvažovat o složeném sdílení tepla (například v pecích).

Tepelným tokem nazýváme tok tepla, který přechází od tělesa s vyšší teplotou k tělesu s nižší teplotou při jejich těsném styku nebo tok proudící prostředím, jímž jsou tělesa obklopena a kterým může procházet vyzařování (sálání).

Přestupem tepla nazýváme výměnu tepla mezi stěnou tuhého tělesa a obtékající kapalinou či plynem. Prostupem tepla nazýváme sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělnými tuhou deskou [1].

V tepelné technice budov se zpravidla předpokládá, že se šíří teplo:

- a) prouděním a sáláním mezi vzduchem a povrchovou konstrukcí,
- b) vedením v pevných vrstvách konstrukcí,
- c) vedením, prouděním a sáláním ve vrstvách konstrukcí vyplněných vzduchem (plynem) [1].

### 1.1.1 Šíření tepla vedením

Vedení (kondukce) tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Šíření tepelné energie v pevných látkách vedením nastane předáním kinetické energie mezi molekulami vlivem teplotních rozdílů. Šíření tepla vedením probíhá i v kapalných a plyných látkách, zde se ovšem uplatňuje ve větší míře šíření spíše tepla prouděním [2].

Molekuly mají v místě s vyšší teplotou vyšší kinetickou energii. Molekuly s vyšší kinetickou energií předávají část své kinetické energie sousedním částicím s nižší pohybovou energií. K tomu dochází prostřednictvím srážek částic. Částice se ale v objemu hmoty nepohybují, pouze oscilují kolem své rovnovážné polohy.

Rychlost, s jakou se tepelná energie šíří v prostředí, popisuje tepelná vodivost. Porovnání různých látek pak umožňuje fyzikální veličina zvaná součinitel tepelné vodivosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pak v praxi rozděluje materiály na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Vedení tepelné energie vedením pak rozdělujeme z hlediska dynamiky na stacionární a nestacionární [3].

Pro případ stacionárního vedení tepelné energie budeme uvažovat jednoduchou, rovinnou desku o tloušťce  $d$ , jejíž konce jsou udržovány na konstantních teplotách  $t_2$  a  $t_1$  ( $t_1 > t_2$ ) a deska je homogenní a izotropní, a proto proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám. Podíl rozdílu teploty na teplém a studeném konci látky a vzdáleností obou konců se nazývá teplotní gradient (teplotní spád) a jeho jednotkou je  $K.m^{-1}$ .

$$gradt = \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pak platí, že množství přeneseného tepla  $Q_t$  (velikost tepelného toku), které prochází plochou  $S$  desky za čas  $\tau$ , je dáno vztahem:

$$Q_\tau = -\lambda \cdot \tau \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} = \lambda \cdot \tau \cdot S \cdot \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Teplu procházející plochou  $S$  určuje tzv. tepelný tok. Množství tepla, které projde plochou za čas, se nazývá hustota tepelného toku.

$$q = \frac{Q_\tau}{\tau S}$$

Po dosazení platí:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pokud se vzdálenost  $d$  zmenšuje na  $dx$ , pak se mění na této vrstvě teplota o hodnotu  $-dt$ , po dosazení platí:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

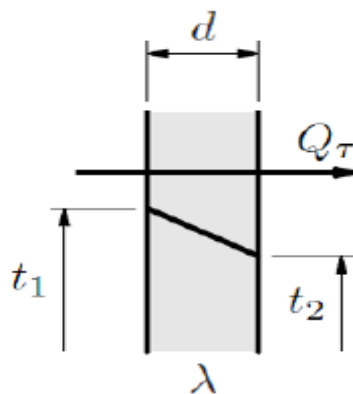
Jedná se o vektorovou veličinu což lze zapsat:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t$$

Tento vztah je znám jako Fourierův zákon, který se dá rozepsat do složek:

$$\vec{q} = \vec{i} q_x + \vec{j} q_y + \vec{k} q_z = -\lambda \left[ \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \right]$$

Slovně vyjádřeno, je tedy hustota tepelného toku  $q$  úměrná teplotnímu gradientu. Konstanta  $\lambda$  se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Tento zákon byl odvozen z empirického poznatku, že množství tepla, které se převede mezi rovnoběžnými deskami různé teploty, které jsou ve vzdálenosti  $dl$ , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. Rovnice lze použít k výpočtu hustoty tepelného toku, ale nelze ji použít k výpočtu průběhu teplotního pole. Pro tento případ je nutno použít vztahu, kde se odvodí z energetické bilance elementárního objemu [1].



Obrázek 1: Schéma stacionárního vedení tepla jednoduchou, homogenní, izotropní deskou [1]

Řešení nestacionárních polí v pevných tělesech je zvláštní případ energetických bilancí neustálených dějů, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným způsobem na toto těleso. Mnohdy se zde setkáváme s nestacionárním vedením tepla při ohřevu nebo ochlazení těles, které v technické praxi značný význam [1].

Při nestacionárním (neustáleném) vedení tepelné energie dochází ke změně teploty v jednotlivých částech tělesa.

Budeme-li uvažovat případ vedení tepelné energie deskou, které nastane při náhlém zvýšení teploty na jednom povrchu desky a desku rozdělíme na plochy o tloušťce  $\Delta x$ , pak se bude hodnota tepelného toku v jednotlivých vrstvách lišit, to je zapříčiněno tím, že část tepla, které do vrstvy vstoupí, se spotřebuje na její ohřátí a tuto tepelnou energii je pak tepelný tok v následující vrstvě nižší.

Teplo, které do vrstvy desky o tloušťce  $\Delta x$ , ploše  $S$  a za čas  $\Delta\tau$ , vstupuje, pak je rovno:

$$Q_1 = q_1 S \Delta\tau$$

Teplo, které vystoupí ze stejné vrstvy a za stejný čas je pak rovno:

$$Q_2 = q_2 S \Delta\tau$$

Platí tedy:

$$Q_1 - Q_2 = (q_1 - q_2) S \Delta\tau = -\Delta q S \Delta\tau$$

Vrstva má určitou měrnou tepelnou kapacitu  $c$ , objemovou hmotnost  $\rho$ , hmotnost  $\Delta m$  a střední teplotu  $t$ . Platí vztah:

$$\Delta m = \rho S \Delta x$$

Přírůstek střední teploty vrstvy za čas  $\Delta\tau$  označíme  $\Delta t$  a tento přírůstek odpovídá právě rozdílu tepel, které do desky vstoupí a které z desky vystoupí.

Pak platí:

$$Q_1 - Q_2 = c \Delta m \Delta t$$

Po dosazení do předešlých vztahů pak dostaneme rovnici:

$$-\Delta q \Delta\tau = c \cdot \rho \Delta x \Delta t$$

Po vhodné úpravě získáme rovnici:

$$\frac{\Delta t}{\Delta\tau} = -\frac{1}{c\rho} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta x}$$

Přechodem k limitě  $\Delta x$  a  $\Delta\tau$  se blíží k nule dostaneme:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = -\frac{1}{c\rho} \frac{\partial q}{\partial x}$$

Derivací jednorozměrného Fourierova zákona  $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$  dle  $x$  získáme:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Pro časovou změnu střední teploty vrstvy získáme pak rovnici:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Tato rovnice představuje jednorozměrnou diferenciální rovnici vedení tepelné energie.

Pro vícerozměrný případ obecně platí:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 t = 0$$

Fundamentální řešení diferenciální rovnice vedení tepelné energie v  $n$  rozměrech je:

$$\Phi(x, \tau) = \frac{\chi_{[0, \infty)}(\tau)}{(4\pi\tau)^{n/2}} e^{-\frac{|x|^2}{4a\tau}}$$

Pro zjednodušení se zavádí veličina zvaná teplotní vodivost. Značí se písmenem  $a$ , někdy jako  $k$  a udává, jak se v daném materiálu vyrovnávají teplotní rozdíly [4].

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

### 1.1.2 Šíření tepla prouděním

Přenos tepelné energie prouděním je charakteristický pro tekuté a plynné látky (případně plazmatu, 4 skupenství), u pevných látek není možné.

Proudění je vyvoláno uměle, například ventilátorem, nebo přirozeně vlivem sdílení tepelné energie.

Dochází zde k přenosu energie z místa o vyšší teplotě na místo o nižší teplotě makroskopickým tokem částic, tj. z hlediska teorie spojitého prostředí přesunem velkých souborů molekul. Ve vícesložkových soustavách se při sdílení hmoty vytvoří koncentrační gradient, který způsobí difúzi části a odpovídající difúzní přenos energie.

Ten souvisí se sdílením hmoty a ve srovnání s přenosem tepla vlivem proudění není obvykle významný. Přenos energie prouděním je vázaný na pohybující se částice a je o řád až dva intenzivnější než prosté molekulární sdílení (vedení tepla) v téže látce. Oba typy přenosů energie probíhají v pohyblivém prostředí souběžně.

Intenzita přenosu energie prouděním závisí na složce intenzity pohybu částic ve směru požadovaného sdílení tepla, tj. směrem k fázovému rozhraní nebo od fázového rozhraní, které představuje plochu tepelné výměny neboli teplosměnnou plochu. Přičemž hlavní proudění tekutiny probíhá podél tohoto fázového rozhraní [2].

Proudění tekutiny při sdílení tepla je, jak již bylo řečeno, je volné nebo nucené. Volné je vyvoláno pouze rozdílem hustot (vlivem rozdílu teplot) u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny. Až na výjimky, například voda v rozmezí teplot 0 až 4 °C, klesá hustota tekutiny se vzrůstající teplotou. Potom platí, že u teplosměnné plochy s nižší teplotou, než je teplota v jádru tekutiny dochází v gravitačním poli Země k pohybu tekutiny

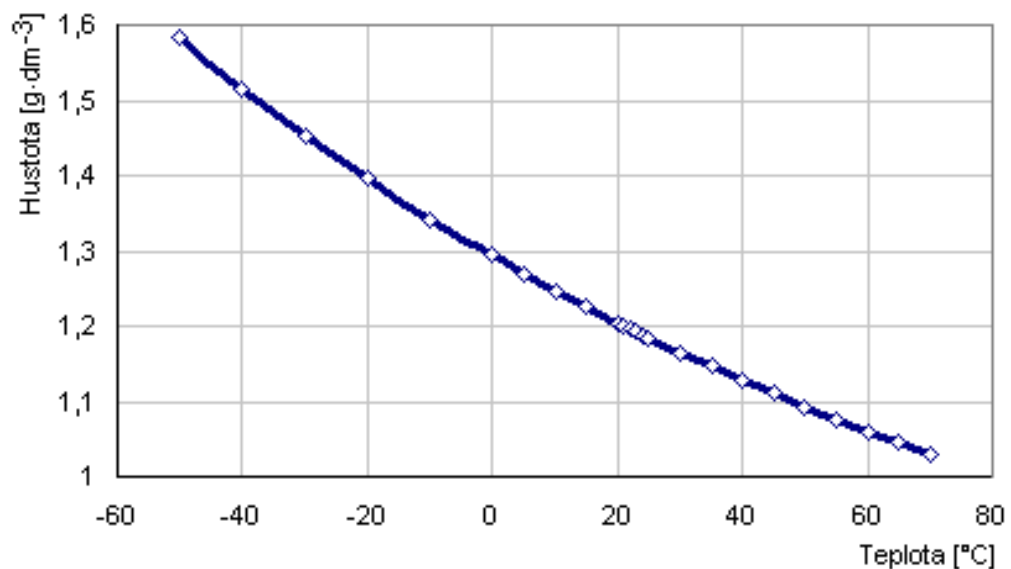
směrem dolů. V jádru tekutiny, kde je vyšší teplota, dochází naopak k pohybu tekutiny směrem vzhůru. V blízkosti nehybné teplosměnné plochy je rychlost proudění nízká, a proudění je zde proto laminární i při turbulentním proudění v jádru tekutiny.

Pro tento případ platí, že se zde vytváří laminární podvrstva, v níž se tekutina pohybuje pouze podél teplosměnné plochy. Napříč touto laminární podvrstvou nemůže tedy nastat přenos energie pohybem části, ale jen jejich molekulárním pohybem, tedy vedením tepla.

Z jádra tekutiny se energie na rozhraní s laminární podvrstvou přenáší nejen se vedením tepla, ale i pohybem tekutiny. Turbulentní fluktuace rychlosti v jádru tekutiny zvyšují intenzitu přenosu energie. V laminární podvrstvě se přenáší energie pouze vedením. Celý tento mechanismus se nazývá sdílení tepla prouděním.

Stejný mechanismus přenosu energie je při nuceném proudění, které může být realizováno různým způsobem.

Z toho vyplývá různá intenzita přenosu energie prouděním. Například nucené proudění může být realizováno rozdílem tlaků nebo samospádem v trubce, nehybné vrstvě sypkého materiálu, v cyklónu, v nádobě s mechanickým míchadlem [5].



Obrázek 2: Graf vlivu teploty na hustotu látky [5]

### 1.1.3 Šíření tepla sáláním

Sálání je proces, při kterém látka emituje energii do prostoru ve formě elektromagnetického záření.



Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním není přenos tepelné energie sáláním podmíněn látkovým prostředím, avšak za předpokladu, že jsou tělesa v prostředí, které propouští záření. Takové prostředí nazýváme transparentní. V praxi to znamená, že k sálání dochází i ve vakuu.

Ke sdílení tepla sáláním dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. Opačný proces nastává u druhého tělesa, které část energie, která dopadne na povrch, absorbuje a přemění jí na vnitřní energii (absorbovaná radiační energie) a část odrazí.

Výkon vyzařujícího předmětu závisí na jeho povrchu  $S$  a teplotě  $T$  (v kelvinech) a je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4$$

Kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $\varepsilon$  je označení pro emisivitu povrchu předmětu a nabývá hodnot z intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ .

Předmět s emisivitou rovno nule je pak nazýváme bílý zářič a předmět s emisivitou rovno hodnotě jedna pak nazýváme černý zářič (záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s teplotou přibližně 5800 Kelvinů).

Výkon, s jakým předmět absorbuje energii tepelného záření, je:

$$P_a = \sigma \varepsilon S T_0^4$$

Předmět, o teplotě  $T$ , vyzařuje energii do okolí, ale současně ji i přijímá. Pokud nebudeme uvažovat přínos záření odraženého je úhrnný výkon dodaný tepelným zářením:

$$P_\Sigma = P_a - P_r = \sigma \varepsilon S (T_0^4 - T_1^4)$$

Celkový tok zářivé energie  $E$  na těleso může být z části odražen (reflexe)  $E_r$ , pohlcen (absorpce)  $E_a$  a částečně propuštěn (transparence)  $E_t$ .

Pak platí:

$$E = E_r + E_a + E_t$$

Množství absorbované a odražené energie závisí na emisivitě druhého tělesa. Těleso, které odrazí 100 % energie se nazývá absolutně bílé těleso a naopak těleso, které absorbuje 100 % energie se nazývá absolutně černé těleso. Na Zemi se ovšem taková tělesa nevyskytují a jsou jen teoretickým předpokladem pro matematicko-fyzikální výpočty [5].

## 1.2 Tepelné vlastnosti

Do oblasti, která charakterizuje tepelné vlastnosti, se řadí především materiálové konstanty jako například měrné teplo, tepelná vodivost, teplotní vodivost, tepelná jímavost a také teplotní roztažnost daného materiálu.

V této kapitole se nejvíce zaměříme na součinitel tepelné vodivosti jakožto hlavní parametr, který rozděluje materiály na tepelné vodiče a izolanty. Zejména v oblasti stavebních izolací a úspory tepelné energie se zabýváme izolačními materiály jenž mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti pod  $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Čím nižší je hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím hůře materiál vede teplo a je tedy lepším tepelně-izolačním materiálem. V minulosti se používala řada přírodních, organických materiálů, jako tepelné izolanty, které jsou v současné době na ústupu (sláma, dřevo nebo korek) a to zejména kvůli ceně (přestože má například korek nesporné výhody). V dnešní době patří mezi nejvíce používané izolační materiály polystyrén, minerální vlna, polyuretan atd.

### 1.2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost ve fyzice označuje schopnost dané látky vést teplo (například konstrukcí). Představuje tedy rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné části konstrukce (zahřáté), do jiných chladnějších částí.

Tepelná vodivost dané látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  (měrná tepelná vodivost).

Součinitel tepelné vodivosti je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád, a přitom se předpokládá, že se teplo šíří pouze v jednom směru (například v desce s rovnoběžnými povrchy). Dle této definice pak můžeme definovat součinitel tepelné vodivosti jako výkon (tzn. teplo za jednotku času), který projde každým čtverečným metrem desky o tloušťce jeden metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhá.

Podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti se rozděluje materiály na dobré a špatné vodiče tepla. K dobrým vodičům patří kovy, například stříbro ( $419 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), hliník ( $209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a zinek ( $113 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Vodivost kapalin je přibližně tisíckrát menší než kovů.

Ještě menší tepelnou vodivost mají plyny, a proto jsou porézní látky špatnými vodiči tepla. Stavební a izolační materiály patří mezi špatné vodiče tepla. Jejich hodnota součinitele tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí  $0,024 \div 5,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Hodnota součinitele tepelné vodivosti je závislá na vlastnostech materiálů, objemové hmotnosti, vlhkosti, teplotě a pórovitosti, přičemž obecně lze součinitel tepelné vodivosti vyjádřit vztahem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_a - \theta_b) S \tau}$$

Reálná hodnota součinitele tepelné vodivosti je pak funkcí řady vnitřních a vnějších proměnných:

$$\lambda = f(\rho_v; w_m; \theta; PR; \varphi(I))$$

Kde  $\rho_v$  je objemová hmotnost materiálu,  $w_m$  je hmotnostní vlhkost materiálu,  $\theta$  je teplota materiálu,  $PR$  je pórovitost,  $\varphi(I)$  je funkce vnitřních proměnných – chemicko-mineralogické složení, fázové složení, krystalické modifikace...[1]

Tabulka 1: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro různé stavební materiály v suchém stavu při teplotě 20 °C [7]

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Objemová hmotnost $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Konopná izolace	0,038 - 0,040	25 - 42
Ovčí vlna	0,034 - 0,049	12,5 - 25
Dřevovláknitá izolace	0,040	250
Pěnový polystyrén	0,033 - 0,044	15 - 40
Vzduch (za normálních podmínek)	0,0262	-
Hutný beton	1,230 - 1,360	2100 - 2300
Nepálená cihla	1,100	2050
Diamant	895-2300	
Zlato	317	
Železo	73	
Sklo	0,6 -1	
Měď	395	

### 1.2.1.1 Vliv hustoty, pórovitosti a objemové hmotnosti na tepelnou vodivost

Mezi hustotou, objemovou hmotností a pórovitostí platí následující vztah:

$$\rho_s = \rho \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

kde  $\rho_s$  je objemová hmotnost v suchém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$\rho$  je hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$p$  je pórovitost [%].

Pórovitost  $p$  vyjadřuje množství póru v materiálu a je dána vztahem:

$$p = \frac{V_p}{V} \cdot 100$$

kde  $V_p$  je objem póru [ $\text{m}^{-3}$ ],

$V$  je objem materiálu [ $\text{m}^{-3}$ ].

Zanedbá-li se hmotnost vzduchu v pórech a je-li materiál suchý, lze pórovitost vyjádřit vztahem:

$$p = \frac{\rho - \rho_s}{\rho_s}$$

kde  $p$  je pórovitost [%],

$\rho$  je hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

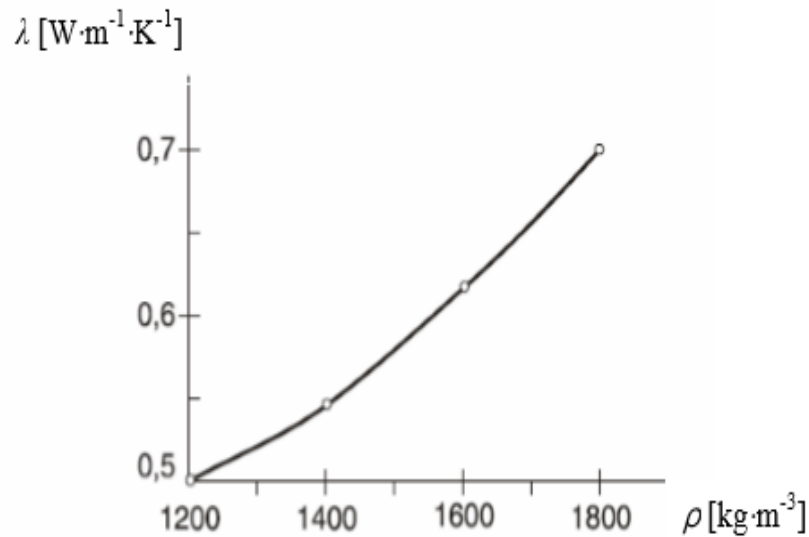
$\rho_s$  je objemová hmotnost v suchém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

V pórech materiálu je vzduch, jehož hodnota součinitele tepelné vodivosti, za normálních podmínek, udává nejnížší možnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních

a tepelněizolačních materiálů (pokud jsou pórovité). Vzhledem k faktu, že pevné části materiálu mají několika násobně větší součinitel tepelné vodivosti než vzduch, je zřejmé, že čím je víc materiál pórovitý, tím může být hodnota součinitele tepelné vodivosti menší.

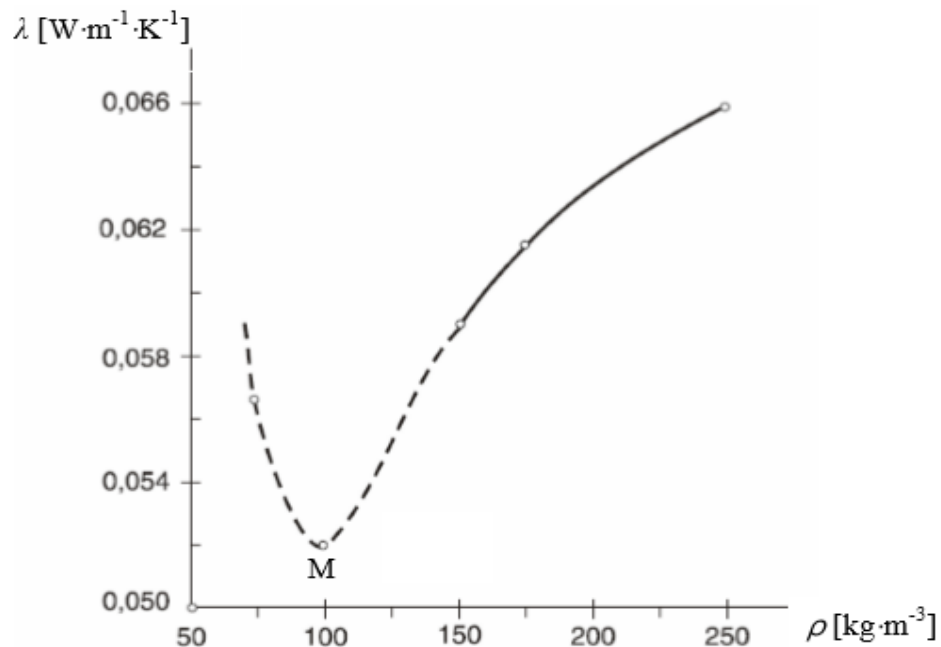
Z daných poznatků plyne, že mezi pórovitostí a objemovou hmotností platí nepřímá úměrnost: čím je větší pórovitost materiálu, tím je menší objemová hmotnost (nemění-li se hustota materiálu).

Za tohoto předpokladu je možno vyjádřit součinitel tepelné vodivosti buď v závislosti na pórovitosti a nebo na objemové hmotnosti. Jelikož se objemová hmotnost zjišťuje snadněji než pórovitost, uplatňuje se častěji.



Obrázek 3: Součinitel tepelné vodivosti škvárobetonu v závislosti na objemové hmotnosti [8]

Z obrázku 3 je patrné, že součinitel tepelné vodivosti je tím větší, čím je vyšší hodnota objemové hmotnosti. Toto pravidlo však obecně neplatí pro všechny materiály za všech okolností.



Obrázek 4: Součinitel tepelné vodivosti minerální vlny v závislosti na objemové hmotnosti [8]

(M – nejnižší hodnota součinitele tepelné vodivosti).

Obrázek 4 znázorňuje dva rozdílné úseky, které rozděluje bod M, tedy bod s nejnižší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

V pravém úseku křivky odpovídá průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti dle pravidla – tepelná vodivost vzrůstá, zvětšuje-li se objemová hmotnost materiálu. V levém úseku téže křivky je závislost opačná. Tato okolnost je vysvětlena tím, že z hlediska šíření tepla ve vzduchových dutinách není důležitá pouze celková pórovitost, ale také velikost, tvar a rozmístění dutin v materiálu. V pórovitých materiálech se teplo šíří nejen vedením, ale i sáláním a za jistých podmínek i prouděním. Výsledný součinitel tepelné vodivosti suchého pórovitého materiálu je pak dán vztahem:

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_k + \lambda_s$$

Kde  $\lambda$  je výsledný součinitel tepelné vodivosti,

$\lambda_v$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla vedením,

$\lambda_k$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla prouděním,

$\lambda_s$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla sáláním.

Veličina  $\lambda$  vyjádřená vztahem  $\lambda = \lambda_v + \lambda_k + \lambda_s$  by se měla nazývat jinak než tepelná vodivost nebo součinitel tepelné vodivosti, např. součinitel šíření tepla.

V praxi se však uchoval termín tepelná vodivost bez ohledu na to, které druhy šíření tepla se vedle vedení podílejí na celkovém šíření tepla v pórovitém materiálu. Tento terminologický problém má historické kořeny.

Šíření tepla materiály se zjišťuje experimentálním způsobem a vyhodnocení výsledků měření se provádí podle rovnice vedení tepla, takže i výsledek se označuje jako tepelná vodivost. Z toho ovšem vyplývá důležitý závěr: k hodnotám tepelné vodivosti materiálu zjištěných měření a vyhodnocených dle rovnice vedení tepla musí být připojeny všechny další dílčí určující parametry, při kterých byly hodnoty stanoveny a které způsobují vždy určité riziko nepřesnosti [8].

### **1.2.1.2 Vliv teploty a vlhkosti na tepelnou vodivost**

Tepelná vodivost stavebních materiálů se zvětšuje, roste-li jejich teplota. Způsobuje to intenzivnější šíření tepla vedením v pevných částicích materiálu a šíření tepla prouděním a sáláním v pórech materiálu.

S dostatečnou přesností lze závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)],$$

kde  $\lambda_0$  je součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $t_0$  (obvykle laboratorní teplota do 30°C),

$b$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu,

Tento vztah byl modifikován pro jednoduché zjištění závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti a teplotě sledovaného materiálu. Lze ho přijmout jako lineární nárůst s vlhkostí i teplotou a je tedy možno vyjádřit jej rovnicí:

$$\lambda = \lambda_0[1 + w * \alpha_w + b(t - t_0)],$$

kde  $\lambda_0$  je součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $t_0$  (obvykle laboratorní teplota do 30°C),

$b$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu,

$\alpha_w$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s vlhkostí materiálu,

$w$  je hmotností vlhkost udaná v %

Vlhkost je ve stavebních materiálech obsažena v různých formách, rozhodující je přitom způsob vazby vlhkosti s materiálem.

1. Chemická vazba: Je součástí strukturní mřížky materiálu, do které se dostává při chemických reakcích a krystalizaci. Vyznačuje se vysokou energetickou úrovní molekulární vazby s materiálem. Za normálních podmínek se ze stavebních konstrukcí nevysuší.
2. Fyzikálně chemická vazba: Vzniká při adsorpci vlhkosti na povrchu póru a kapilár, ani tato vlhkost se nevysuší za normálních klimatických podmínek.
3. Fyzikálně mechanická vazba: Udržuje se v pórech a kapilárách v důsledku kapilárního tlaku a smáčivosti hydrofilních materiálů, tento druh vlhkosti se vypařuje z konstrukcí poměrně snadno za normálních klimatických podmínek.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost, za teplotních podmínek, kterým jsou stavební materiály vystaveny, se projevuje tak, že roste-li vlhkost materiálu, zvyšuje se i jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti. To se zdůvodňuje obecně dvěma příčinami.

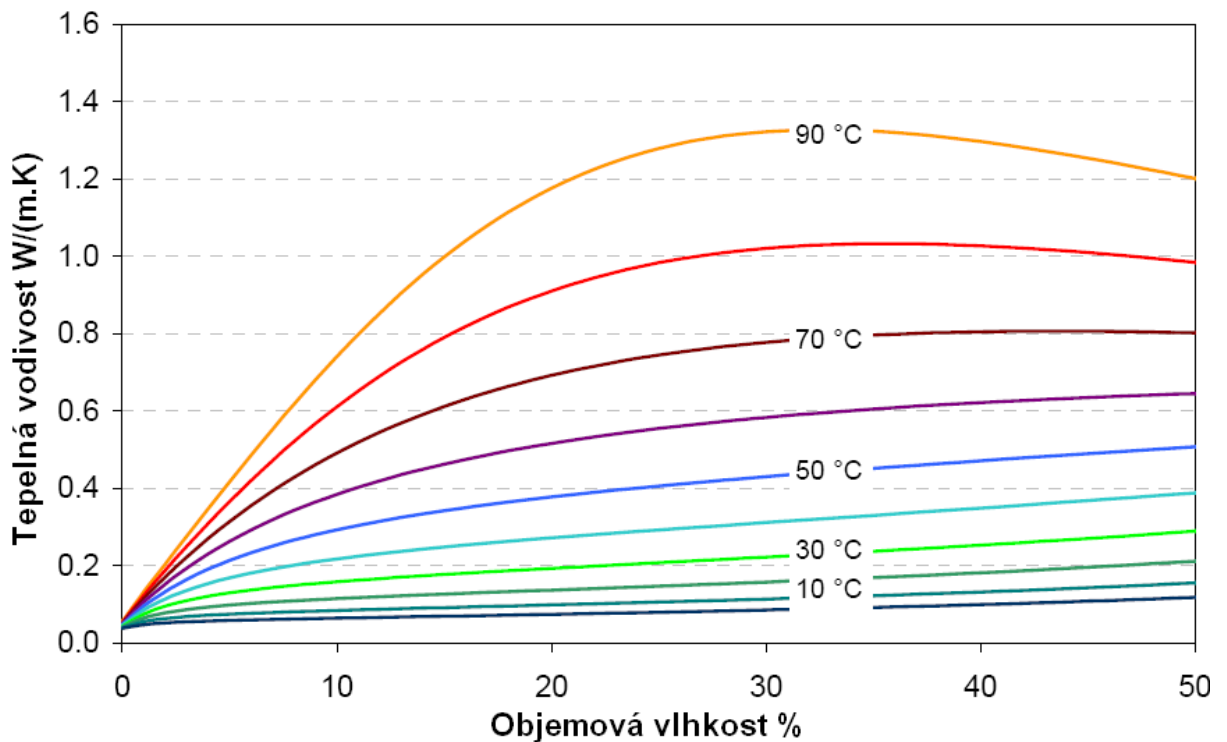
První vychází z faktu, že voda v pórech materiálu, která je zde místo vzduchu, má tepelnou vodivost zhruba 25krát větší než vzduch. Druhá příčina má oporu ve skutečnosti, že při působení rozdílu teplot ve vlhkém materiálu, vzniká vedle tepla vedením, prouděním a sáláním také přenos tepla proudící vlhkostí.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost materiálu může být ještě mnohem výraznější, jestliže se změní voda v led. Je to z důvodu, že hodnota součinitele tepelné vodivosti ledu je zhruba 2,2 W/(m.K). Problém je však stanovit teplotu, při které se mění voda v led v pórech materiálu. Z experimentálních výsledků je známo, že tato přeměna nastává při teplotách nižších než je bod mrazu volné vody (0 °C). Platí ale, že čím jsou póry materiálu menší, tím je nižší teplota, při které se změní voda v led. Například voda v pórech 3,2 μm zamrzla při teplotě -4 °C a v pórech o 1,4 μm při teplotě -17 °C [8].

Tabulka 2: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na hmotnostní vlhkosti a objemové hmotnosti. [8]

$\rho_s$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] při $u_m$ [%]					
	0	5	10	15	20	25
400	0,116	0,137	0,157	0,178	0,198	0,219
500	0,145	0,171	0,197	0,222	0,247	0,272
600	0,169	0,198	0,228	0,257	0,286	0,316
700	0,204	0,240	0,274	0,311	0,347	0,381
800	0,238	0,280	0,322	0,364	0,405	0,447
900	0,279	0,328	0,377	0,426	0,475	0,523





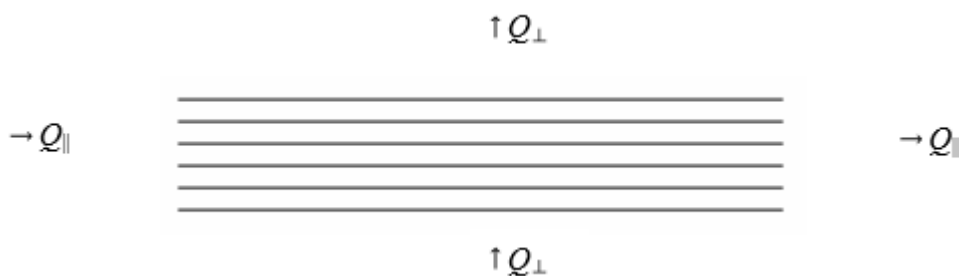
Obrázek 5: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové vlhkosti a teplotě materiálu.

[8]

### 1.2.1.3 Vliv směru tepelného toku na tepelnou vodivost

Vliv směru tepelného toku se projevuje u neizotropních materiálů, tj. materiály, které se vyznačují různými vlastnostmi v různých směrech. Typickým představitelem neizotropního materiálu je například materiál z minerálních vláken. Model struktury takového materiálu můžeme vidět na obrázku CSX.

Rovnoběžné uspořádání vláken, jejichž délka je mnohonásobně větší než jejich tloušťka, vytváří vzduchové dutiny s malou tloušťkou kolmo na vlákna a s velkou tloušťkou vzduchové dutiny rovnoběžně s vlákny.



Obrázek 6: Model struktury neizotropního materiálu [6]

Zvětšuje-li se velikost pórů (vzduchových dutin), roste i hodnota tepelné vodivosti vzduchu v této dutině.

Z toho plyne fakt, že je-li směr tepelného toku rovnoběžný s vlákny, tj. ve směru vzduchových dutin s velkou tloušťkou, pak je jeho hodnota větší, než proudí-li kolmo na vlákna, kolmo na vzduchové dutiny s malou tloušťkou. U tepelné vodivosti to znamená, že tepelná vodivost materiálu ve směru kolmém na vlákna je menší než tepelná vodivost ve směru rovnoběžném s vlákny.

Vláknité materiály, zvláště ty z minerální vlny, patří k tzv. měkkým nebo polotuhým materiálům. Může se tedy měnit, vlivem stlačení, objemová hmotnost a tím také pórovitost. Dochází přitom ke změně celkové pórovitosti a také ke změně dutin mezi vlákny. To má za následek změnu tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti. U vláknitých materiálů má vliv na tepelnou vodivost také tloušťka vláken. Například skleněná vlákna při tloušťce vláken 15,5  $\mu\text{m}$  mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,041  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a při tloušťce 35,2  $\mu\text{m}$  hodnotu 0,045  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Dále u minerální vlny působí nepříznivě na tepelnou vodivost také množství nerozvlákněného materiálu, který zvyšuje jeho tepelnou vodivost [8].

#### 1.2.1.4 Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost

Vliv struktury na tepelnou vodivost je vidět v tabulce K. Jsou zde hodnoty součinitele tepelné vodivosti různých pevných částic skeletu pórovitého materiálu. Z porovnání největší a nejmenší hodnoty v tabulce vyplývá, že se odlišují přibližně 17krát. Ve skutečnosti ale nejsou rozdíly v hodnotách tak rapidní, jak ukazují uvedené hodnoty. Je to z důvodu, že šíření tepla vedením tvoří pouze malou část z celkového toku proudícího pórovitým materiálem [8].

Tabulka 3: Součinitel tepelné vodivosti různých pevných částí skeletu pórovitého materiálu [8]

Materiál	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Vápenec amorfni	0,43 – 0,88
Mramor bílý	2,99
Rula	3,86
Křemen kolmo k ose	7,44

Některé stavební a tepelně izolační materiály jsou složeny z materiálů s různou tepelnou vodivostí. Obecně pak platí, že výsledná tepelná vodivost je tím větší, čím je větší tepelná vodivost jednotlivých složek daného materiálu.

Chemické složení má rovněž vliv na tepelnou vodivost. Uvádí se, že materiály zásaditého charakteru jsou lepšími vodiči tepla než materiály kyselého charakteru [8].

### **1.2.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti**

Stanovení součinitele tepelné vodivosti lze hned několika způsoby, které se od sebe liší teplotním stavem a dále způsobem stanovení a vyhodnocení tepelné vodivosti zkušební vzorku. Obecně se metody dělí na stacionární a nestacionární.

Stacionární metody vycházejí ze vztahu  $Q.d$ , kdy je nutno zajistit ustálený tepelný tok procházející od teplejšího povrchu měřeného vzorku k jeho chladnějšímu povrchu. Pak lze z rozdílu teplot, průřezu a tloušťky vzorku vypočítat jeho součinitel tepelné vodivosti. Mezi stacionární metody se řadí metoda chráněné teplé desky, metoda válce, metoda koule a metoda elipsoidu.

Nestacionární měření je založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Tyto metody nevyžadují ustálený teplotní stav, sledují průběh šíření teplotní vlny měřeným vzorkem. Na základě různého způsobu sledování nestacionárního vývoje během měření pak rozlišujeme metodu nestacionárního tepelného toku a metodu tepelných impulsů (metoda horkého drátu – Hot Wire Method, záblesková metoda Laser Flash Method).

Nestacionární metody lze též dělit z hlediska časové závislosti výkonu tepelného zdroje na metody s impulsním tepelným zdrojem, s kontinuálním tepelným zdrojem a s periodickým tepelným zdrojem [9].

### **1.2.1.6 Součinitel tepelné vodivosti ve výpočtu**

V České republice se běžně využívá postup výpočtu návrhových hodnot součinitele tepelné vodivosti materiálů podle 3. části ČSN 73 0540, která byla naposledy revidovaná v roce 2005.

Tato norma definuje deklarované, návrhové a charakteristické tepelné hodnoty stavebních materiálů a popisuje poměrně složitý postup přepočtu z hodnot

deklarovaných přes charakteristické na návrhové. Pokud projektant nechce nebo nemůže tento postup využít, protože nezná všechny potřebné údaje, může vzít návrhové hodnoty z informativní přílohy A (případně i B), kde jsou uvedeny normové, charakteristické a návrhové hodnoty běžně používaných stavebních materiálů. Obě možnosti jsou přípustné [11].

#### **1.2.1.6.1 Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti**

Deklarovaná hodnota je hodnota stanovená výrobcem podle příslušné výrobkové normy při definovaných podmínkách (střední teplota při měření  $10 \pm 0,3$  °C; vlhkost zkušebních vzorků, která je dána kondicionováním zkušebních vzorků nejméně 6 h při teplotě vzduchu  $23 \pm 5$  °C a relativní vlhkosti  $50 \pm 5$  %, tedy ve stavu neustálené sorpční, popř. desorpční vlhkosti  $u_{23/50}$  – některé normy výrobku upřesňují kondicionování zkušebních vzorků). Pro jednotlivé tepelněizolační materiály se postupuje dle norem výrobku řady ČSN EN 13162 až ČSN EN 13171. Deklarované hodnoty součinitele tepelné vodivosti mohou tvořit podklad pro stanovení návrhových hodnot [11].

#### **1.2.1.6.2 Charakteristická hodnota součinitele tepelné vodivosti**

Charakteristická hodnota je odvozena pro stanovenou charakteristickou hodnotu vlhkosti  $u_{23/80}$ . Charakteristická hmotnostní vlhkost  $u_{23/80}$  je rovnovážná sorpční hmotnostní vlhkost materiálu, stanovená za podmínek teplota vzduchu  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkost vzduchu  $80 \pm 3$  %.

Při uvádění výrobků na trh v České republice, na které se vztahují příslušné evropské harmonizované normy výrobku, nemají povinnost výrobci uvádět charakteristické hodnoty. Obvykle uvádějí pouze deklarované hodnoty dle příslušných referenčních podmínek. S ohledem na tuto skutečnost to znamená, že je třeba při návrhu výrobku do stavby postupovat s určitou znalostí těchto vlastností.

Charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti lze stanovit z deklarované hodnoty součinitele tepelné vodivosti (hodnota stanovená v suchém stavu) dle vztahu [11]:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_D}{1 - Z_u \cdot W_{mk}}$$

kde:  $\lambda_D$  ... deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti dle příslušné normy výrobku,

$Z_u$  ... vlhkostní součinitel dle přílohy A1 v ČSN 730540-3,

$W_{mk}$  ... charakteristická vlhkost materiálu, obvykle  $u_{23/80}$ .

*POZNÁMKA: Postup stanovení charakteristické hodnoty součinitele tepelné vodivosti stanoví ČSN 72 7014 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu, Vyhodnocení zkoušek [11].*

### 1.2.1.6.3 Naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti

Naměřená hodnota je hodnota statisticky vyhodnocená z naměřených hodnot z dostatečné četnosti zkoušek. Naměřená hodnota je vázaná na stanovené referenční podmínky při měření a stavu vlhkosti výrobku.

Pokud referenční podmínky a stav určují vlastnost výrobku zabudovaného v konstrukci, lze naměřenou hodnotu použít přímo do výpočtu.

V případě, že naměřená hodnota je specifikovaná dle referenčních podmínek a stavu vlhkosti určující charakteristickou hodnotu, tak tato hodnota tvoří podklad pro stanovení návrhové hodnoty.

Přepočet na základě charakteristických hodnot  $\lambda$  a součinitelů

Pokud chce projektant získat co nejpřesnější návrhové hodnoty součinitele tepelné vodivosti, obvykle si vyžádá u výrobce materiálu charakteristické hodnoty. Ty zavedla ČSN 73 0540-3 z důvodu parametrického srovnání naměřených deklarovaných hodnot různých materiálů.

Dále musí projektant uvažovat s veličinami:

$Z_u$  – vlhkostním součinitelem materiálu,

$z_1$  – součinitelem vnitřního prostředí pro vnitřní konstrukce, kde dochází ke kondenzaci vodní páry,

$z_2$  – součinitelem materiálu,

$z_3$  – součinitelem způsobu zabudování materiálu/výrobku do stavební konstrukce,

popřípadě  $z_{23}$  – sdruženým součinitelem podmínek působení (součinitelem materiálu, a způsobu zabudování materiálu ve stavební konstrukci) [11].

Výrobci nejsou povinni charakteristické hodnoty  $\lambda$  uvádět, ani měřit, ale aby vyšli vstříc poptávce trhu, finančně nákladné měření ve většině případů provedou. Je zřejmé, že tento stav nejvíce vyhovuje zkušebním ústavům. Těm norma vychází vstříc více než výrobcům stavebních hmot a projektantům, kterým má primárně sloužit. Zkušebny provádí měření s velmi vysokou přesností (dle protokolů na 5 i více desetinných míst), kterou rovněž firmy ani projektanti neumějí využít.

Nevýhodou je i to, že norma při výpočtu návrhových hodnot neuvažuje s degradací materiálu jako je například jeho stárnutí nebo degradace vlivem proudění vzduchu v materiálu či sáláním [11].

#### **1.2.1.6.4 Návrhové hodnoty $\lambda$ podle informativní přílohy A ČSN 73 0540-3**

Většina projektantů z těchto důvodů místo výše uvedeného výpočtu použije raději návrhové hodnoty  $\lambda$  z informativní přílohy normy nebo v případě minerálních izolací zhorší deklarovanou hodnotu o 10 až 15 %. Ani jedna z těchto variant bohužel neodpovídá reálným hodnotám a většinu izolačních materiálů poškozují. Hodnoty v informativní příloze normy jsou více než 8 let staré a za tu dobu tepelné izolace dosáhly výrazného zlepšení svých vlastností.

Stejný problém nastává u většiny běžně používaných výpočetních programů, které mají předdefinované návrhové hodnoty a nezohledňují způsoby zabudování materiálu (je rozdíl mezi svislou a vodorovnou konstrukcí v rámci hodnoty součinitele způsobu zabudování materiálu  $z_3$ ).

Mohlo by se zdát, že čím horší návrhová hodnota bude, tím více to bude výrobcům izolačních hmot vyhovovat, protože aplikované tloušťky izolací porostou. Trend je však nastavený jiným směrem. Poptávka po nízkoenergetických a pasivních domech stoupá. A díky lepším tepelně technickým parametrům izolací lze stavět subtilnější konstrukce, jejichž výhodou je nejen větší úspora tepla, ale také menší obestavěný prostor, respektive větší vnitřní obytný prostor. I výrobci minerálních izolací se neustále snaží vylepšovat tepelně izolační schopnost vyráběných materiálů a v případě výpočtu návrhových hodnot usilují o maximální přiblížení reálným a bezpečným hodnotám.

Hodnoty pro minerální izolace jsou navíc v ČSN 73 0540-3 zcela nelogicky děleny podle objemových hmotností, které výrobci neuvádí a podle kterých nelze jednoznačně určovat tepelný výkon izolací. Ten je závislý nejen na objemové hmotnosti, ale také na průměru, délce a orientaci vláken a složení vstupních surovin [11].

#### **1.2.1.6.5 ČSN EN ISO 10 456**

Podle této evropské normy lze jednoduše návrhové hodnoty získat z deklarovaných hodnot. V přepočtu je uvažováno s převodním teplotním faktorem  $F_T$ , převodním vlhkostním faktorem  $F_m$ , s přirozeným prouděním tepla v izolačním materiálu  $Ra_m$  a částečně také se stárnutím materiálu. Tento postup jednoznačně více odpovídá reálným návrhovým hodnotám, jak je zřejmé z tabulky 1. Postup je srozumitelný, jednoduchý, zbytečně nezatěžuje výrobce stavebních hmot a je jednotný napříč státy EU.

Přestože se jedná o evropskou normu, která by měla být té české nadřazená, není tomu tak. V případě stanovení návrhových hodnot součinitelů tepelné vodivosti je v ČSN EN ISO 10 456 uvedena národní poznámka, která se odvolává na ČSN 73 0540. Tím se stává ČSN 73 0540 nadřazenou nad normou evropskou [11].

### **1.2.2 Tepelná kapacita**

Měrné teplo  $c$ , neboli měrná tepelná kapacita, je definována jako množství tepla  $Q$  v Joulech, které je potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň. Teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti  $m$  o teplotu  $\Delta t$  lze vypočítat ze vztahu:

$$Q = mc\Delta t$$

kde  $\Delta t = t_2 - t_1$  je rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou.

Hodnota měrné tepelné kapacity je mírně závislá na teplotě, a proto se pro větší teplotní intervaly uvádí střední měrná tepelná kapacita  $c$ .

Tabulka 4. Hodnoty měrné tepelné kapacity různých materiálů [8]

Látka	$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Voda	4180
Vzduch (0 °C)	1003
Led	2430
Zlato	129
Absolutně suché dřevo	1450

K určování hodnot měrného tepla se využívá kalorimetrická rovnice.

U plynů se rozlišuje měrná tepelná kapacita při stálém tlaku  $c_p$  a při stálém objemu  $c_v$ . Vztah mezi těmito měrnými tepelnými kapacitami udává Poissonova konstanta a Mayerův vztah.

Nejsou-li známé hodnoty měrné tepelné kapacity, je možno použít orientační hodnoty:

$$c = 1880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály organického přirozeného původu}$$

$$c = 1250 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály organického umělého původu a smíšené anorganicko-organického původu}$$

$$c = 840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály anorganického původu}$$

Z hlediska tepelné techniky je důležitá znalost závislosti měrné tepelné kapacity na vlhkosti. Stanovuje se experimentálně [8].

Tabulka 5: Přehled hodnot měrné tepelné kapacity škvárobetonu v závislosti na hmotnostích vlhkosti. [8]

$u_m$ [%]	0	5	10	15	20
$c$ [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,808	0,963	1,097	1,214	1,310

Platí obecný vzorec:

$$c = \frac{c_s + 42 \cdot u_m}{1 + 0,01 \cdot u_m}$$

kde  $c$  je výsledná hodnota,

$c_s$  je měrná tepelná kapacita v suchém stavu,

$u_m$  je hmotností vlhkost [8].



### **1.2.3 Metody měření součinitele tepelné vodivosti**

Měření tepelné vodivosti lze v podstatě provést hned několika způsoby, které jsou určeny především tepelným režimem, v němž se dané měření uskutečňuje.

Nejčastěji se měření provádí ve stacionárním a nestacionárním režimu. Pro každý z těchto způsobů bylo vyvinuto několik metod, které se úspěšně používají.

Obecně lze předpokládat, že pro dobře tepelně vodivé materiály postačí stacionární metody a pro tepelné izolanty a výpočet závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti, jsou vhodnější metody nestacionární [1].

#### **1.2.3.1 Stacionární metody měření tepelné vodivosti**

Základní princip je při všech metodách stejný – teplo přechází od povrchu vyhřívané desky, válce, koule nebo elipsoidu izolační vrstvou k chladnějšímu povrchu, kde se odvádí. Při měření se pak zjišťuje tloušťka vzorku, obě povrchové teploty a množství tepla (nejčastěji převodem elektrické energie spotřebované ve vyhřívacím zařízení).

Na starších měřicích přístrojích se určovalo množství tepla z oteplení nebo ochlazení a množství přiváděné kapaliny.

Základní a tou nejvíce důležitou podmínkou pro měřicí metodu je předpoklad, že celé přiváděné teplo prochází zkušebním vzorkem při ustáleném stavu a bez ztrát.

Měřicí zařízení tedy musí být zkonstruováno tak, aby se vyloučily boční ztráty odklonem tepla a aby byly zajištěny rovnoběžné tepelné proudnice.

Mezi metody a přístroje měření při stacionárním toku tepla patří tři hlavní typy:

- Deskový přístroj dle Poensgena a Bocka,
- Válcový přístroj Van Rinsuma,
- Kulový přístroj dle Nusselta [8].

##### **1.2.3.1.1 Absolutní stacionární bez-zdrojové metody**

Absolutní metody vycházejí z definice tepelné vodivosti podle Fourierova zákona. Pro určení teplotní vodivosti je tedy nutno znát hustotu tepelného toku a gradient teploty.

Vztahy pro určení tepelné vodivosti vyplývají z teplotních funkcí (rozložení teploty na vzorku), které jsou dané pro konkrétní tvar vzorku [17].

Tabulka 6: tvar teplotní funkce v závislosti na tvaru vzorku. [17]

Tvar vzorku	Tvar teplotní funkce
Planparalelní destička	$T_{(x)} = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{h}x$
Dutý válec	$T_{(r)} = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}; r_1 < r < r_2$
Dutá koule	$T_{(r)} = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); r_1 < r < r_2$

### 1.2.3.1.1 Metoda desky

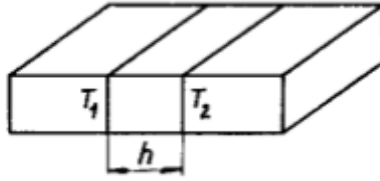
Vzorek tvaru planparalelní destičky je umístěn mezi dvě prostředí, z nichž jedno má funkci ohříváče a druhé funkci chladiče. Jako ohříváč (teplá deska) se používá dobře tepelné vodivá látka, (hliník, měď), ve které je zabudované elektrické vyhřívací zařízení. Jak chladič (chladná deska) se používá také látka s dobrou tepelnou vodivostí, ovšem bez vyhřívání, nebo prostředí se stálou teplotou (například směs ledu a vody). Norma ČSN 72 7012-1 udává, že emisivita styčného povrchu obou látek musí být nejméně 0,8.

V ustáleném stavu se změří teploty ohříváče  $T_1$  a chladiče  $T_2$  a tepelný tok  $q_s$ . Tepelná vodivost se pak vypočítá ze vztahu:

$$\lambda = \frac{q_s \cdot h}{S(T_2 - T_1)}$$

Kde  $h$  je tloušťka vzorku,  $S$  je plošný obsah vzorku. Tento vztah platí pouze v případě, že tepelný tok má směr pouze v ose vzorku, to znamená, že nedochází k tepelným ztrátám (ani ziskům) na boční hraně vzorku. Norma ČSN 72 7012-1 udává pouze způsob kompenzace boků zkušební tělesa.

Metodou lze dosáhnout velmi dobrých výsledků měření pouze pro látky s dobrou tepelnou vodivostí, například pro kovy. Při měření látek s nízkou tepelnou vodivostí vznikají problémy s únikem tepla na opačnou stranu, i přes použití izolačních materiálů. To přináší do měření velkou systematickou chybu. Tento problém lze částečně eliminovat pomocí dvoj-vzorkového zkušebního zařízení, kde se mezi dva stejné vzorky vloží ohřívací zařízení. Tento postup popisuje norma ŠSN 72 7012-2 [17].



Obrázek 7: Schéma uspořádán přístroje na měření součinitele tepelné vodivosti metodou chráněné topné desky [17]

### 1.2.3.1.1.2 Metoda koule

Vzorek má tvar duté koule. Uvnitř je symetricky rozložený zdroj a z vnější strany je umístěna izolační látka. Po dosažení ustáleného stavu se změří teploty na vnější a vnitřní straně vzorku a výkon zdroje. Tepelná vodivost se pak určí vztahem:

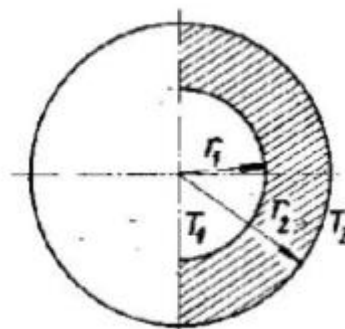
$$\lambda = \frac{q_s}{2\pi(T_2 - T_1)} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Při použití této metody se vyhneme problémům souvisejícími s tepelnými ztrátami zdroje, ale měření mohou být kompromitována z důvodu nerovnoměrného rozložení tepelného toku.

Tepelné ztráty vznikají hlavně v otvorech pro termočlánky a nedokonalou teplotní izolací.

Tato je v praxi použitelná pouze pro sypké a nebo kapalně materiály, jelikož je velmi náročné vyrobit vzorek z tuhého materiálu.

Norma ČSN 72 7013 uvádí, že tepelná koule musí být zhotovena z dobře vodivého kovu, nejlépe mědi a tolerance průměru by neměla být vyšší než  $\pm 1 \%$ . Emisivita povrchu musí být nejméně 0,8 [17].



Obrázek 8: Schéma uspořádán přístroje na měření součinitele tepelné vodivosti sypkých materiálů [17]

### 1.2.3.1.1.3 Metoda válce

Vzorek je tvaru dutého válce, kde platí, že jeho délka musí být několikanásobně větší než jeho průměr. Uvnitř vzorku je umístěn tepelný zdroj, z vnější strany je pak umístěna tepelná izolace.

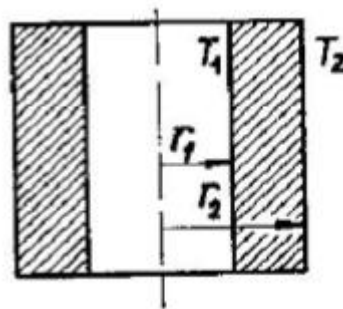
Norma ČSN 72 7011 udává, že zkušební potrubí musí být zhotoveno z dobře vodivého kovu, tolerance průměrů je  $\pm 1 \%$  a hodnota emisivity musí být minimálně 0,8.

Po dosažení ustáleného teplotního stavu se změří teploty na vnitřním a vnějším povrchu válce a výkon zdroje.

Tepelnou vodivost pak určíme ze vztahu:

$$\lambda = \frac{q_s}{2\pi l(T_2 - T_1)} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Tento vztah avšak platí pouze v případě, že odvod tepla na bocích vzorku je zanedbatelný, toho lze dosáhnout použitím pomocných ohřivačů a izolantů [17].



Obrázek 9: Rozměrové schéma válcové měřicí metody [17]

### 1.2.3.1.1.4 Metoda elipsoidu

Vzorek je těleso ohraničené dvěma elipsoidními plochami se společnými ohnisky. Ve vnitřním elipsoidu je umístěn tepelný zdroj. Teplota se indikuje na dvou místech ve směru malé poloosy. Tepelná vodivost se pak určí vztahem:

$$\lambda = \frac{q_s}{8\pi a(T_2 - T_1)} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + R_2^2} + a}{\sqrt{a^2 + R_2^2} - a} \cdot \frac{\sqrt{a^2 + R_1^2} - a}{\sqrt{a^2 + R_1^2} + a} \right)$$

Vzhledem k problémům s přípravou zkušební vzorku se tato metoda příliš nepoužívá a je uvedena čistě informativně. Použití této metody je vhodné při měření při vyšších teplotách, kde má určité výhody oproti metodě koule [17].

### 1.2.3.1.2 Relativní stacionární bez-zdrojové metody

Oproti absolutním metodám se liší tím, že měření při tepelného toku se přidá vzorek se známou tepelnou vodivostí, tzv. normálou. Relativní metody zjednodušují měření, ale vznikají zde jiné problémy související s tepelným kontaktem mezi vzorkem a normálou, s měřením teploty na více místech atd. Při měření se pracuje s destičkami, koulí a nebo válcem [17].

#### 1.2.3.1.2.1 Metoda desky

Vzorek měřené látky a normála jsou vloženy mezi dva bloky, z nichž jeden je vyhříváný. Při ustáleném stavu a při zanedbání odvodu tepla z povrchu vzorku a normálu prochází vzorkem i normálou stejné množství tepla.

$$\lambda_0 S_0 \frac{\Delta T_0}{h_0} = \lambda S \frac{\Delta T}{h_1}$$

Kde  $\lambda_0$  je tepelná vodivost normály,  $S_0$  je průřez normály,  $\Delta T_0$  je teplota normály a  $h_0$  je tloušťka normály. Z tohoto vztahu lze vyjádřit vztah pro výpočet tepelné vodivosti vzorku:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{S_0 h_1 \Delta T_0}{S h_0 \Delta T}$$

Volbou stejného průřezu vzorky a normály se vztah zjednoduší:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{h_1 \Delta T_0}{h_0 \Delta T}$$

Volbou stejného průřezu zajistíme homogenní tepelný tok vzorkem. Aby bylo dosaženo co možná největší přesnosti měření je potřeba omezit odvod tepla z povrchu vzorku a normály. Tato metoda je náročná na přípravu vzorků a normály, proto je její využití spíše laboratorní. Měří se zde s přesností do 1 % [17].

#### 1.2.3.1.2.2 Metoda koule

Uspořádání je realizováno tak, že normála je dutá koule, která je obalena druhou dutou koulí, která tvoří vzorek. Tato metoda je vhodná pro sypké a kapalné materiály.

Pokud je tepelný tok vzorkem stejný jak u vzorku, tak u normály, pak je možno pomocí teplotní funkce vyjádřit součinitel tepelné vodivosti vztahem:

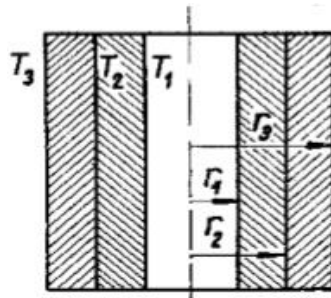
$$\lambda = \lambda_0 \frac{r_1(r_3 - r_2)\Delta T}{r_3(r_2 - r_1)\Delta T_0}$$

Tímto způsobem je možno odvodit i vztah pro tvar elipsoidu [17].

### 1.2.3.1.2.3 Metoda válců

Vzorek a normála jsou duté válce, těsně zasunuté do sebe. Tato metoda je vhodná pro sypké a kapalné materiály. Tepelná vodivost vzorku se pak určí dle vztahu [17]:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\Delta T_0 \ln \frac{r}{r_1}}{\Delta T \ln \frac{r_1}{r_0}}$$



Obrázek 10: Rozměrové schéma válcové měřicí metody [17]

### 1.2.3.1.2.4 Metoda tyčí

Na rozdíl od předešlých metod je při této metodě nutno brát v úvahu i odvod tepla z povrchu vzorku a normály. Je tedy nutno znát koeficient odvodu tepla ze vzorku a normály.

$$\lambda_0 \beta_0 \chi_0^2 = \lambda \beta \chi^2$$

Z tohoto vztahu lze pak jednoduše vyjádřit tepelnou vodivost vzorku:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\beta \chi^2}{\beta_0 \chi_0^2}$$

Pokud se zajistí stejné podmínky pro odvod tepla z povrchu vzorku a normály, tak se vztah upraví na [17]:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\chi^2}{\chi_0^2}$$

### 1.2.3.2 Nestacionární metody měření součinitele tepelné vodivosti

Způsoby měření při neustáleném teplotním stavu jsou založeny na podobném principu jako ustálená měření, ale jsou krátkodobé a vyžadují si zkušební tělesa s malými tloušťkami. Tyto okolnosti jsou příčinou velké nepřesnosti měření, na druhou stranu je ale měření velmi rychlé a umožňuje tak zkoušení vlhkých vzorků a určení vlivu vlhkosti na tepelnou vodivost.

- Fitchova metoda
- LaserFlash metoda
- Metoda horkého drátu

#### Regulární stav I. druhu

Regulární stav I. druhu vyjadřuje průběh oteplování (nebo ochlazování) tělesa v prostředí s teplotou  $T_0$ , který není závislý na počátečním rozložení teploty ani na poloze bodu v tělese a je vyjádřen funkcí:

$$T(t) = T_0 + Ae^{-mt}$$

Koeficient  $A$  je závislý na počátečním rozložení teploty a tvaru vzorku. Koeficient  $m$  vyjadřuje rychlost oteplování (nebo ochlazování).

$$m = -\frac{\partial}{\partial t} \ln \left| \frac{T - T_0}{T_0} \right|$$

#### Regulární stav II. druhu

Tento stav vzniká ve vzorku po uplynutí určitého časového intervalu od okamžiku vložení vzorku do prostředí s konstantně se měnící teplotou. Tento stav tedy vzniká při oteplování (nebo ochlazování) a platí:

$$\frac{dT}{dt} = b_0 = \text{konstanta}$$

Tento stav je charakteristický tím, že rozdíl teplot je, v libovolném bodu ve vzorku a teploty prostředí, stejný [17].

Tabulka 7: tvar teplotní funkce v závislosti na tvaru vzorku. [17]

Tvar vzorku	Teplotní funkce
Nekonečná destička s tloušťkou 2h	$T(x, t) = T_0 + b_0 t - \frac{b_0}{2k} (h^2 - x^2) - \frac{hb_0 \lambda}{k\beta}$
Nekonečný válec s poloměrem 2R	$T(x, t) = T_0 + b_0 t - \frac{b_0}{4k} (R^2 - x^2) - \frac{hb_0 \lambda}{2k\beta}$
Koule s poloměrem R	$T(x, t) = T_0 + b_0 t - \frac{b_0}{6k} (R^2 - x^2) - \frac{hb_0 \lambda}{3k\beta}$

### 1.2.3.2.1 Nestacionární metody s konstantní počáteční metodou

Pokud je vzorek ve styku s prostředím, kterému odevzdává (nebo naopak přijímá) teplo dle vztahu:

$$dQ = (\beta_k - \beta_z)(\bar{T} + \bar{T}_0)dSdt$$

Pro polo-nekonečný vzorek lze určit matematické řešení diferenciální rovnice vedení tepla s ohledem na povrchové podmínky pro dva případy. První variantou je úloha s povrchovou podmínkou I. druhu, pak je řešením teplotní funkce, která určuje rozložení teploty ve vzorku:

$$T(x, t) = T_0 + (T_0 - T_e) \phi \left[ \frac{x}{2\sqrt{kt}} \right]$$

V tomto případě je teplota vzorku a prostředí v čase  $t=0$  s rovna  $T_0$ , v čase  $t>0$  se rovný povrch vzorku dostane do styku s prostředím o konstantní teplotě  $T_e$ .

V druhém případě se z povrchu vzorku s počáteční teplotou  $T_0$  odvádí teplo konvencí nebo sáláním do prostředí se stálou teplotou  $T_e$ . V tomto případě uvažujeme tedy povrchové podmínky III. druhu. Teplotní funkce pro tento případ má tvar:

$$T(x, t) = T_0 + (T_0 - T_e) \left\{ \left[ 1 - \phi \left( \frac{x}{2\sqrt{kt}} \right) \right] \exp \left( \frac{Bx}{\lambda} + \frac{\beta^2 kt}{\lambda^2} \right) \left[ 1 - \phi \left( \frac{x}{2\sqrt{kt}} + \frac{\beta}{\lambda} \sqrt{kt} \right) \right] \right\}$$

Známé jsou i řešení pro vzorky tvaru nekonečné desky, ohraničené desky, nekonečného i ohraničeného válce a pro kouli. Tato řešení nalezneme v citované literatuře [17].



### 1.2.3.2.1.1 Nestacionární metoda horkého drátu

Tato metoda je založena na měření teplotního nárůstu v definované vzdálenosti od lineárního zdroje tepla – horkého drátu. Elektrická energie je dodávána do tenkého kovového drátu (sondy), který je umístěn ve vzorku a slouží jako zdroj tepla a současně i jako teplotní čidlo.

Ideální matematický model je založen na předpokladu, že horký drát je dokonalý, nekonečně tenký a dlouhý linkový zdroj tepla, který je v nekonečném obklopení homogenního a izotropního materiálu s konstantní vstupní teplotou. Jestliže je  $q$  je konstantní množství produkce tepla vztažené na jednotku času a jednotkou délku drátu topení, v té době  $t=0$  s, nastane paprskovité proudění tepla kolem drátu. Pak teplotní růst  $\Delta T$  u paprskovité pozice  $r$  od zdroje tepla odpovídá zjednodušené rovnici:

$$\Delta T = \frac{Q}{4\lambda\pi} (\ln t + A)$$

Kde  $Q$  je konstantní množství tepla produkované zdrojem (drátem) vztažené na jednotku času a jednotkou délku,  $t$  je čas a  $A$  je konstanta. Tepelnou vodivost můžeme určit dle vztahu:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \bigg/ \frac{d\Delta T}{d \ln t}$$

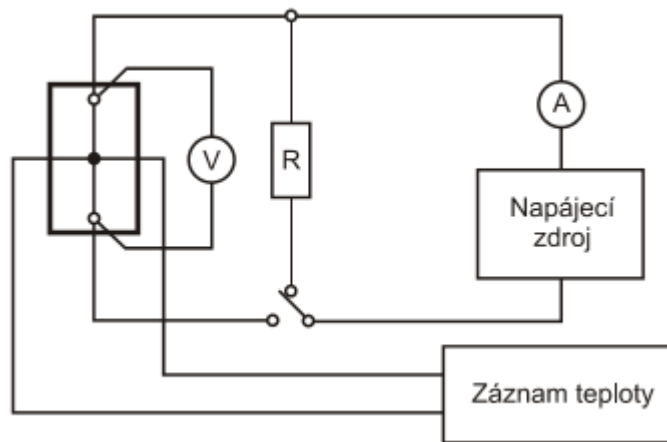
Sonda má funkci ohříváče i čidla, čidlo bývá standardně uspořádáno buď křížovým uspořádáním nebo pomocí odporového topného drátu.

Jsou dostupné tři měřicí techniky: standardní, křížová drátová technika, odpor-potenciální metoda olova.

Měření se provádí v souladu s postupem dle normy ČSN EN ISO 8894-1, kde je definován měřicí postup stanovení součinitele tepelné vodivosti žáruvzdorných výrobků a materiálů metodou topného drátu. Metoda horkého drátu je použitelná pro materiály pevné, kapalné i sypké.

Na měření se standardně připraví dva až tři vzorky, jejichž rozměry jsou alespoň 200 x 100 x 50 mm. Povrchové plochy vzorků, které se ve zkušebním tělese dotýkají, musí být zabroušeny tak, aby odchylka od rovinnosti dvou bodů nebyla větší než 0,2 mm. Před začátkem měření je třeba vytemperovat měřicí soustavu do stacionárního stavu, dále se připojí obvod topného drátu ke zdroji, který je nastaven tak, aby nárůst

teploty dosahoval maximálně 100 °C za 15 min. Od tohoto okamžiku dochází k záznamu teploty na topném drátu.



Obrázek 11: Uspořádání měřícího zařízení [8]

Hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  se pak vypočítá ze vztahu:

$$\lambda = \frac{I \cdot U_m}{4\pi} \cdot \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\Delta t_2 - \Delta t_1},$$

kde  $I$  je topný proud v [A],

$U_m$  je úbytek napětí na délkovou jednotku topného drátu ve [V.m<sup>-1</sup>],

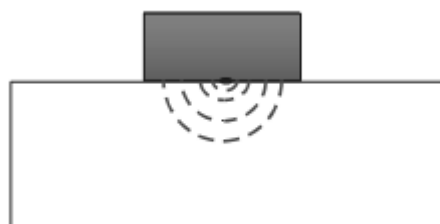
$R_m$  je elektrický odpor topného drátu vztažený na délkovou jednotku v [Ω.m<sup>-1</sup>],

$\tau_2, \tau_1$  jsou časy od zapojení topného okruhu v [min],

$\Delta t_1$  a  $\Delta t_2$  zvýšení teploty topného drátu po zapojení okruhu v časech  $\tau_2, \tau_1$  [°C].

Tato metoda je mnohdy používána v průmyslových měřících systémech, přičemž pro zjednodušení měření je tepelný zdroj integrován v tělese zkušební sondy daných vlastností.

Tedy měřící soustava se skládá ze dvou ohraničených poloprostorů – zkušební sondy a zkušební vzorku [8].



Obrázek 12: Princip stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu [8]

Protože vlastnosti zkušební sondy jsou při měření vždy konstantní, lze tyto přístroje nakalibrovat dvěma referenčními materiály se známou hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ .

$$b = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{x_2 - x_1}$$

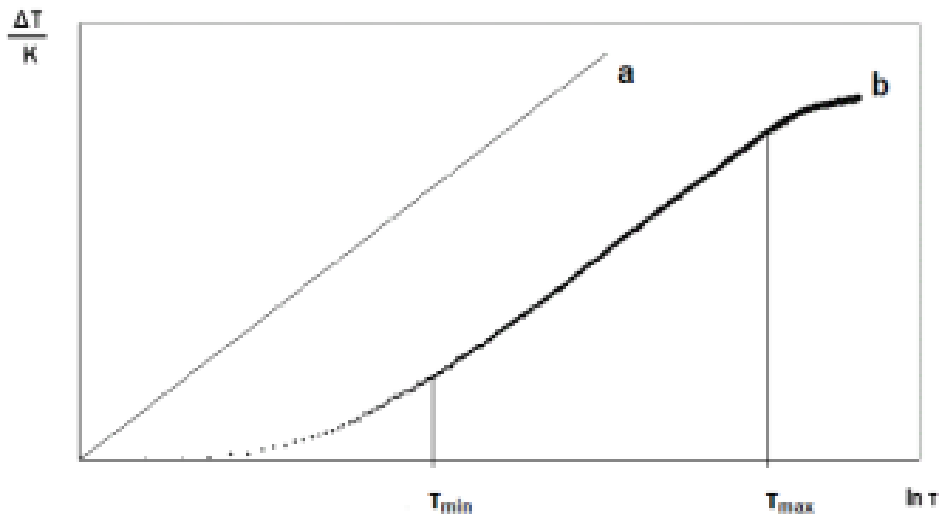
$$a = \lambda_1 - b \cdot \lambda_2$$

Přičemž veličina  $x$  představuje okamžitou rychlost regulárního ohřevu:

$$x = \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\Delta t_2 - \Delta t_1}$$

Hodnota součinitele tepelné vodivosti zkušebnímu materiálu je pak určena pomocí kalibračních konstant dle vztahu [8]:

$$\lambda = a + b \cdot x$$



Obrázek 13: Princip stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu [8]

### 1.2.3.2.1.2 Fitchova metoda

Fitchova metoda je nejvíce používaná laboratorní metoda měření tepelné vodivosti při nestacionárních podmínkách.

U přístroje dle Fitche proudí teplo z ohřívací nádoby přes zkušební těleso do měrného válce. Pomocí diferenciálně zapojených termočlánků se sleduje na vhodném přístroji (milivoltmetr, galvanometr) rozdíl teplo na dně ohřívací nádoby a měrného válce v regulární fázi za stanovenou dobu.

Vlastní přístroj je válcového typu a je dvojdílný. V jeho spodní části je uprostřed uložen měděný váleček s přesně opracovanou horní plochou, která nepatrně přesahuje nad

horní izolační desku spodní části přístroje. Uvnitř válečku je pevně uložený spoj termoelektrického článku, konec je vyveden na svorky upevněné na plášti. Celý prostor okolo válečku je tepelně izolovaný proti ztrátám tepla do okolí.

Horní část je vyrobena ve formě měděné válcové nádoby s plošně přesným měděným dnem, ve kterém je uložen druhý konec termočlánku. Pomocí termostatu se vytemperuje ohřívací nádoba Fitchova přístroje na danou teplotu.

Na měrný válec se položí zkušební těleso a ručním ovládáním se sníží ohřívací nádoba tak, aby tlak mezi dnem nádoby a měrným válcem, působícím na zkušební těleso odpovídal tlaku, při kterém byla naměřena tloušťka zkušebního tělesa.

Před vlastním měřením tepelné vodivosti se zjistí doba náběhu k dosažení lineární závislosti změny rozdílu teplot na čase pro zkoušený materiál.

Po nastavení příslušného tlaku a po uplynutí doby náběhu zkoušky se zaznamená výchylka galvanometru ( $p_1$ ) s po uplynutí 2 minut výchylka ( $p_2$ ). Ohřívací nádoba se opět zvedne nahoru a po ochlazení prstence na teplotu prostředí a měrného válce na zjištěnou hodnotu je přístroj připraven k měření.

Sypké a vláknité materiály se upravují do přístroje podobně jako při Poensgenově metodě. Použije se tenká obruč z fólie nebo tvrdého papíru a její prostor se vyplní vypočítaným množstvím izolačního materiálu.

Vzhledem na malou tloušťku vzorku, na určité nepřesnosti termočládkového měření, poměrně malé teplotní rozdíly a na ztráty tepla do okolí, je přesnost výsledku horší než při metodách za ustáleného tepelného toku. Přesto se však tento přístroj využívá na měření vlhkých vzorků [12].

### **1.2.3.2.1.3 Novější metody měření pomocí přístroje ISOMET 2104**

Současným trendem jsou metody a přístroje, které jsou jednoduché, rychlé, přesné, počítačem vyhodnocované a poměrně drahé. Multifunkční zařízení ISOMET 2104 je mikroprocesorem řízený mobilní přístroj pro přímé měření termo-fyzikálních vlastností (součinitele tepelné a teplotní vodivosti a tepelné kapacity). ISOMET 2104 používá nestacionární měřicí metodu, která redukuje dobu měření na 10 – 16 minut. ISOMET 2104 je vybaven vyměnitelnými sondami (jehlové – pro sypké materiály a vláknité, plošné – pro pevné materiály). Každá sonda obsahuje zabudovanou paměť, ve které jsou

uloženy její kalibrační konstanty. Měření je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu.

Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou použity k výpočtu měřených veličin. ISOMET 2104 umožňuje jednoduchou interaktivní komunikaci s uživatelem, optimalizuje podmínky měření z hlediska minimální spotřeby energie a doby měření. Má zabudovanou paměť pro 500 měření, napájení buď akumulátorem nebo síťovým adaptérem 9 V. Rozsah pracovních teplot je od -30 °C do +100 °C. Součinitel tepelné vodivosti dokáže měřit v rozsahu:

Jehlová sonda:           0,015 – 1 W/(m.K),

Plošná sonda:           0,015 – 5 W/(m.K) [13]..

## **2. Experimentální část – stanovení tepelných charakteristik metodou *hot-wire* experimentálním měřidlem s označením Kateřina.**

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce měřidla, jež vychází z procesu tzv. regulárního ohřevu a věnuje se nestacionární metodě měření tepelné vodivosti a tepelné kapacity metodou „*hot-wire*“.

Identifikace tepelné vodivosti modifikovanou metodou topného drátu pracuje na základě těchto předpokladů:

- a) topnou plochu je možno uvažovat jako nekonečně tenkou a její tepelnou a teplotní vodivost za zanedbatelnou, ale zároveň se předpokládá zcela rovnoměrné šíření tepla po celé ploše.
- b) materiálový vzorek lze uvažovat jako nekonečně dlouhý vzorek s minimální tloušťkou 20 mm.
- c) materiál je považován za dokonale homogenní a izotropní, se skalárními charakteristikami  $\lambda$ ,  $a$  a  $c$ .
- d) charakteristiky  $\lambda$ ,  $c$  a  $a$  je možné v dané teplotní úrovni měření považovat za nezávislé na teplotě vzorku  $T(r,t)$  pro jakýkoliv poloměr  $r \in R + i$  čas ze stejné množiny. Množinu  $R+$  považujeme za množinu kladných reálných čísel.
- e) teplota okolí vzorku je konstantní v jakékoliv vzdálenosti od měřeného vzorku.

### **2.1 Měřicí přístroj s označením Kateřina**

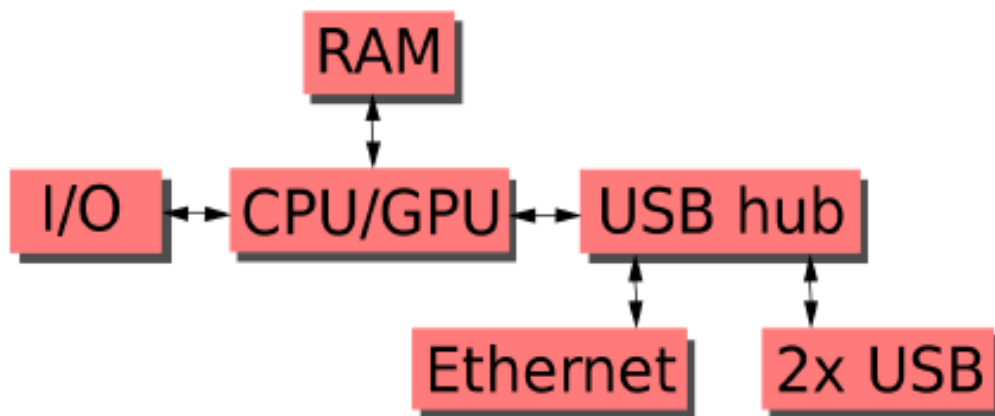
Modifikace metody horkého drátu spočívá ve změně tepelného zdroje, přičemž experimentálně zkusíme tepelný zdroj ve tvaru výseče kruhu. Předpokládáme, že plochá vydává ve všech směrech stejné teplo a je dokonale tenká.

Samotné měřicí ústrojí se skládá z několika částí, necht' je to sonda s topnou plochou a teplotními čidly, řídicí ústrojí a deska s mikroprocesorem a převodníky.

#### **2.1.1 Řídicí ústrojí Raspberry Pi s kapacitním LCD**

Raspberry Pi je skupina jednodeskových počítačů původně vyráběných za účelem podpory výuky informatiky na školách. Deska plošného spoje takového počítače je

přibližně  $8 \times 5$  cm. Tyto počítače obsahují ve všech svých verzích čipy od společnosti Broadcom s integrovanou centrální procesorovou jednotkou architektury ARM a grafickou jednotkou na stejném čipu. Frekvence procesoru v těchto počítačích se různí napříč modely. Liší se též počet jader procesoru i šířka datové sběrnice. Tyto počítače mají prozatím největší velikost operační paměti 1 GB. Tato paměť je ovšem sdílená a grafickým jádrem a rozdělení paměti mezi grafickou a procesorovou jednotkou lze v operačním systému měnit. Operační systém je uchováván na paměťové kartě microSD. Každý model těchto počítačů má alespoň jeden USB port, ke kterému je možné připojit USB periferie (myš, klávesnice, flash disk, externí disk). Většina modelů má ethernetový konektor a nejnovější model Raspberry Pi 3 má na desce integrován Wi-Fi a Bluetooth modul.



Obrázek 14: Schéma počítače Raspberry Pi 3 [6]

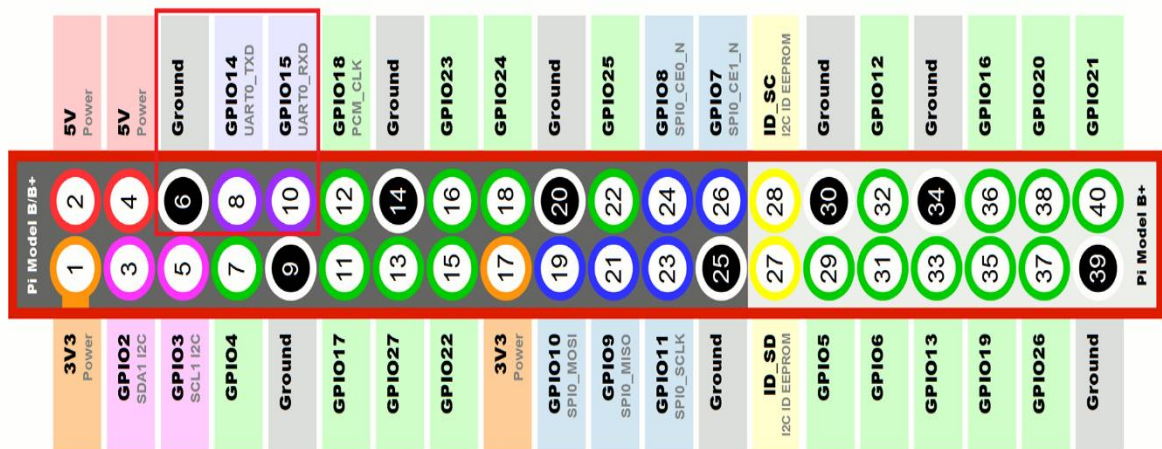
Pro realizaci této práce bylo zakoupeno nejnovější Raspberry Pi 3. Tento konkrétní model má ve své verzi V1.2 použit čip Broadcom BCM2836 s 1200 Mhz, čtyřjádrovým procesorem s šířkou datové sběrnice 32 bitů. Paměť RAM je 1 GB. Má čtyři USB porty, HDMI, ethernet, slot na microSD kartu (byla využita 16 Gb paměťová karta) a 40ti pinový konektor s napájecími piny a GPIO piny. Počítač je napájen konektorem miniUSB. K tomuto počítači byl dále zakoupen kapacitní dotykový LCD.



Obrázek 15: Využitý počítač Raspberry Pi3 [6]



Obrázek 16: Použité LCD k počítači Raspberry Pi 3

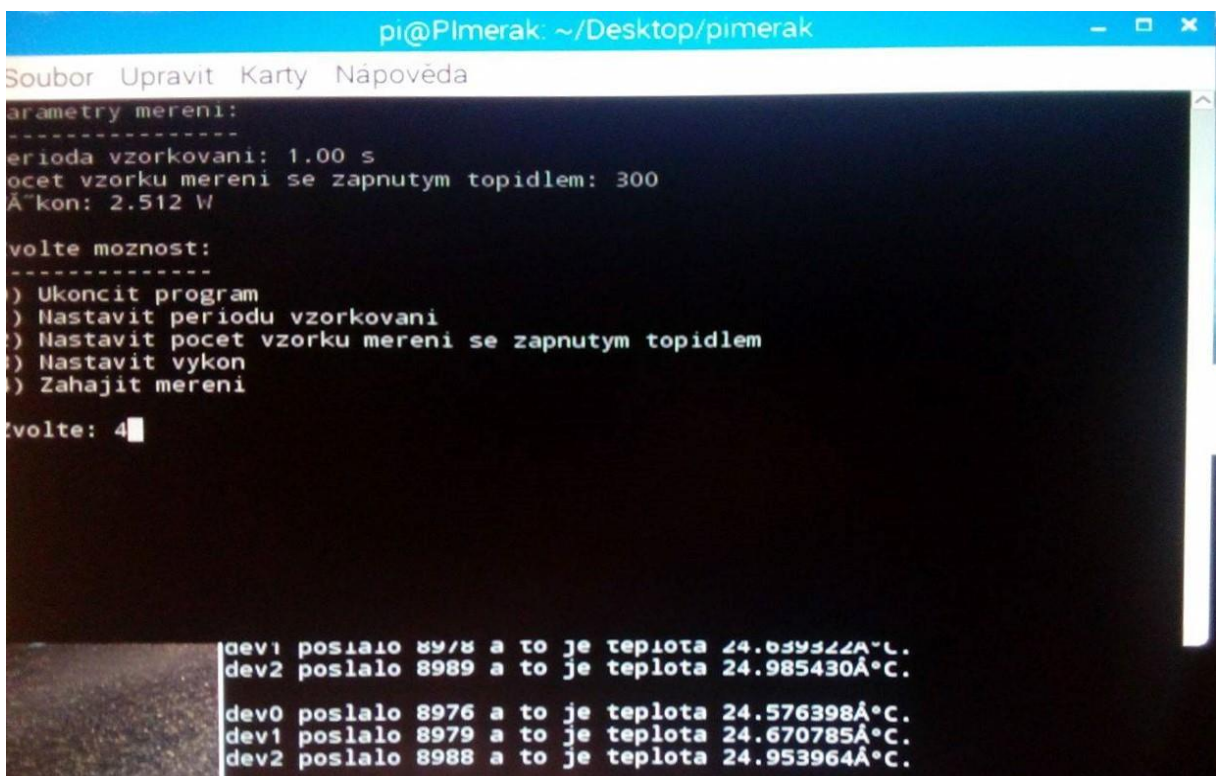


Obrázek 17: Schéma pinových konektorů Raspberry Pi 3 [6]



## 2.1.2 Operační systém pro Raspberry Pi 3 Raspbian

Raspbian je operační systém určený pro počítače Raspberry Pi. Jedná se o Linuxovou distribuci odvozenou od Debianu. Tento operační systém je přeložen pro platformy ARM a i386. Tento systém je seskládán tak, aby byl méně náročný na výkon počítače a systémové zdroje. Proto je použito upravené grafické prostředí LXDE a Openbox manažer oken. Systém obsahuje monolitické jádro, což má výhodu v rychlosti. Sám systém poskytuje programům veškeré služby a zprostředkovává přístup k hardware. Drivery jednotlivých periférií jsou zaveditelné jako moduly jádra. Balíčkovací systém, skrze něhož jsou distribuovány knihovny a programy je dpkg. Systém je opensource, a tudíž je zdarma (většinou v general public licence).



```
pi@Pimerak: ~/Desktop/pimerak
Soubor Upravit Karty Nápověda
parametry mereni:
-----
perioda vzorkovani: 1.00 s
pocet vzorku mereni se zapnutym topidlem: 300
Vykon: 2.512 W

volte moznost:
-----
) Ukončit program
) Nastavit periodu vzorkovani
) Nastavit pocet vzorku mereni se zapnutym topidlem
) Nastavit vykon
) Zahajit mereni

volte: 4

dev1 poslalo 8978 a to je teplota 24.639522A°C.
dev2 poslalo 8989 a to je teplota 24.985430A°C.

dev0 poslalo 8976 a to je teplota 24.576398A°C.
dev1 poslalo 8979 a to je teplota 24.670785A°C.
dev2 poslalo 8988 a to je teplota 24.953964A°C.
```

Obrázek 18: Pohled na řídicí a měřicí program v Raspberry Pi 3

## 2.1.3 Platinové teplotní senzory

Velkou výhodou platinových senzorů teploty je jejich veliká chemická netečnost, časová stálost parametrů a velmi vysoká teplota tání. Měřicí odpory jsou vyráběny drátovou, tenkovrstvou a tlustovrstvou technologií. Měřicí odpor je pak zataven do keramiky případně do skla.

Při měření těmito senzory dochází k systematické chybě, způsobené relativními délkovými změnami použitých materiálů. Takto způsobená chyba má charakter hystereze a její velikost nepřesahuje hodnotu  $\pm 0.25\%$ . Nejlepší stability měřícího odporu lze u platinových snímačů dosáhnout volným uložením ve vzduchu nebo ve směsi hélia a kyslíku. Čistota platiny se posuzuje podle tzv. redukovaného odporu  $w_{100}$  a dělí se do dvou tolerančních tříd A a B dle mezinárodního doporučení IEC.

$$w_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385$$

Třída A je stanovena pro rozsah  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Třída B je pak stanovena pro rozsahy

$-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Standardní hodnota je  $100\ \Omega$  pro teplotu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž platí vztah pro vyhodnocení výsledného odporu při jiné teplotě než  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$R_{\vartheta} = [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 * (\vartheta - 100)] [\Omega]$$

kde  $w_{100} = 1,385$

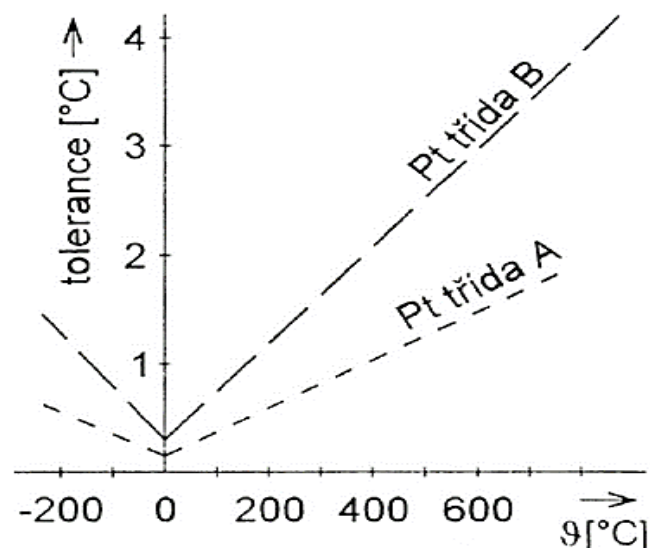
$$R_0 = 100\ \Omega$$

$$A = 3,9080201 * 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$$

$$B = 5,8020001 * 10^{-7}\ \text{K}^{-2}$$

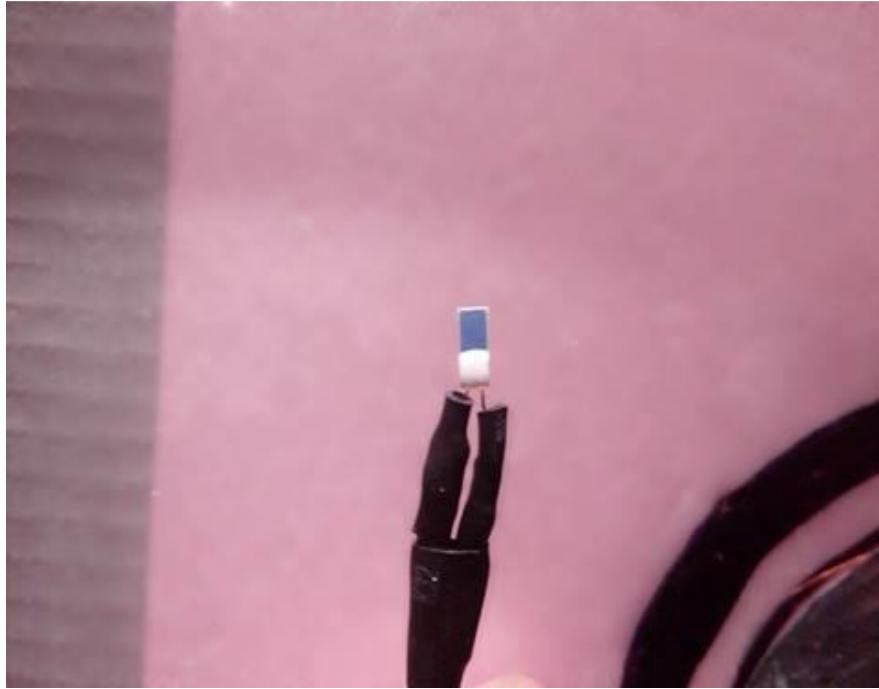
$$C = 0\ \text{pro } \vartheta < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$C = -4,2735001 * 10^{-12}\ \text{K}^{-3}\ \text{pro } \vartheta > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$



Obrázek 19: Tolerance Pt1000 standardních měřících odporů [17]

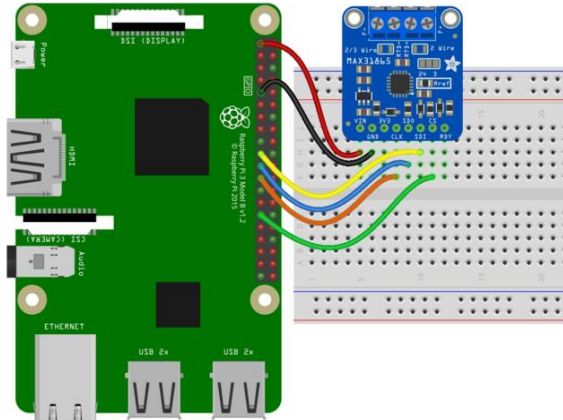
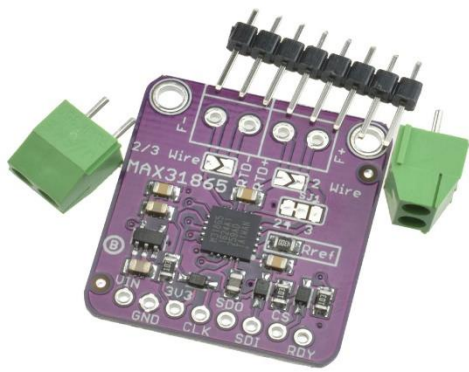
Senzory jsou vyráběny se dvěma nebo čtyřmi vývody. V případě použití dvou vodičového zapojení vzniká chyba měření vlivem parazitních odporů vývodů ze snímače. Nejistota způsobená těmito vývody se pohybuje v rozmezí hodnot 0.1 °C až 0.5 °C. V případě, že tuto chybu nelze zanedbat se používá čtyřvodičové uspořádání [17].



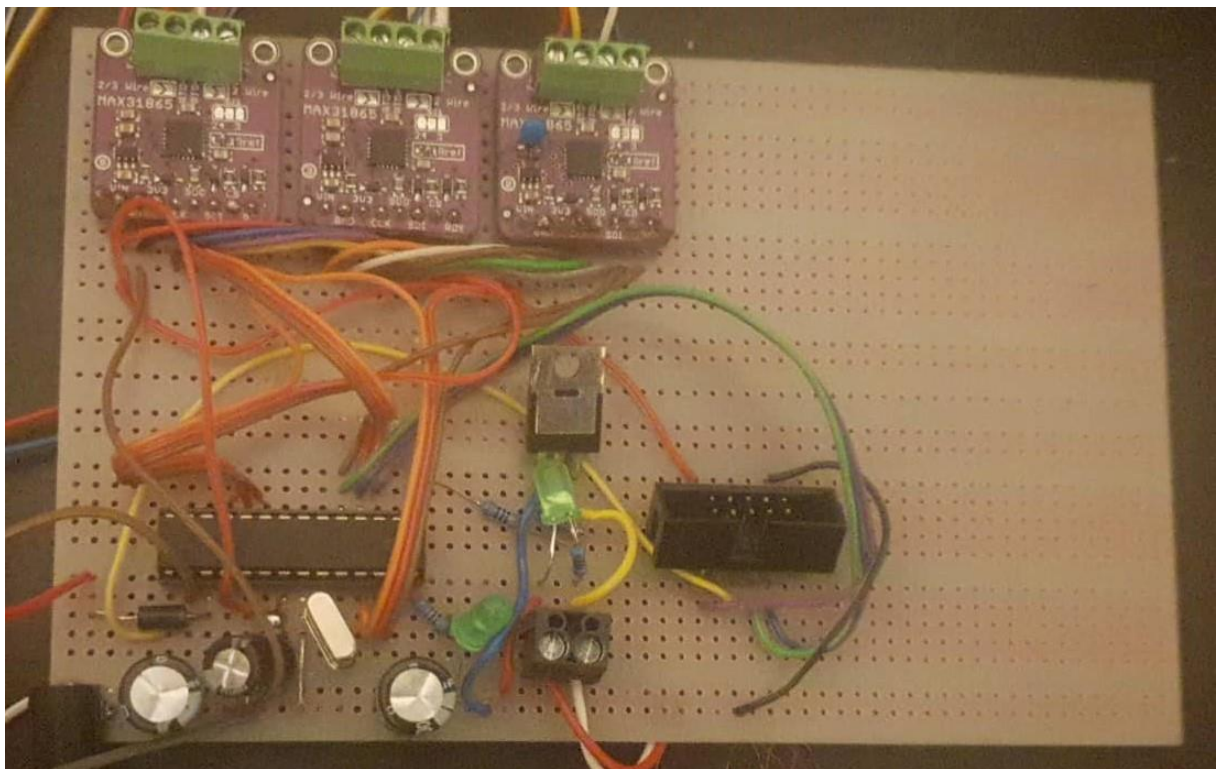
Obrázek 20: Vzhled teplotního čidla typu Pt1000

Každé čidlo je připojeno na MAX31865. Tyto obvody zpracovávají signál z čidel Pt1000 (MAX31865 měří čtyřvodičovou metodou elektrický odpor čidla Pt1000, který je závislý na teplotě). Všechny obvody přenáší dále naměřený signál do mikroprocesoru Atmel ATmega 8, který je řízen počítačem Raspberry, jenž zároveň řídí teplotu topidla. Atmel ATmega 8 přijímá naměřené hodnoty (a dále je posílá do RP) a také řídí periody vzorkování a počet vzorků. Celkem máme k dispozici tři teplotní čidla. První čidlo měří teplotu okolního prostředí, druhé čidlo teplotu topného tělesa a třetí čidlo měří teplotu ve vzdálenosti 0,5 cm od topného tělesa.





Obrázek 12: Obvod MAX31865 [18]    Obrázek 23: Připojení MAX31865 k Raspberry Pi3 [18]

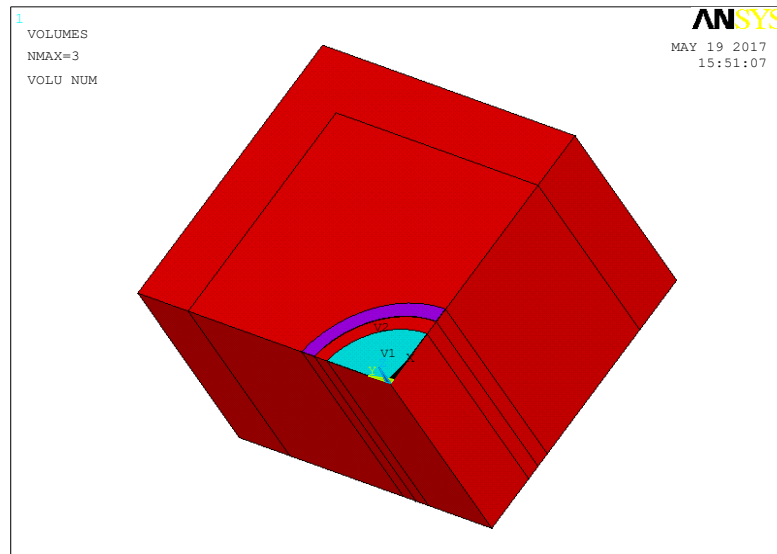


Obrázek 24: Reálné zapojení měřicího ústrojí

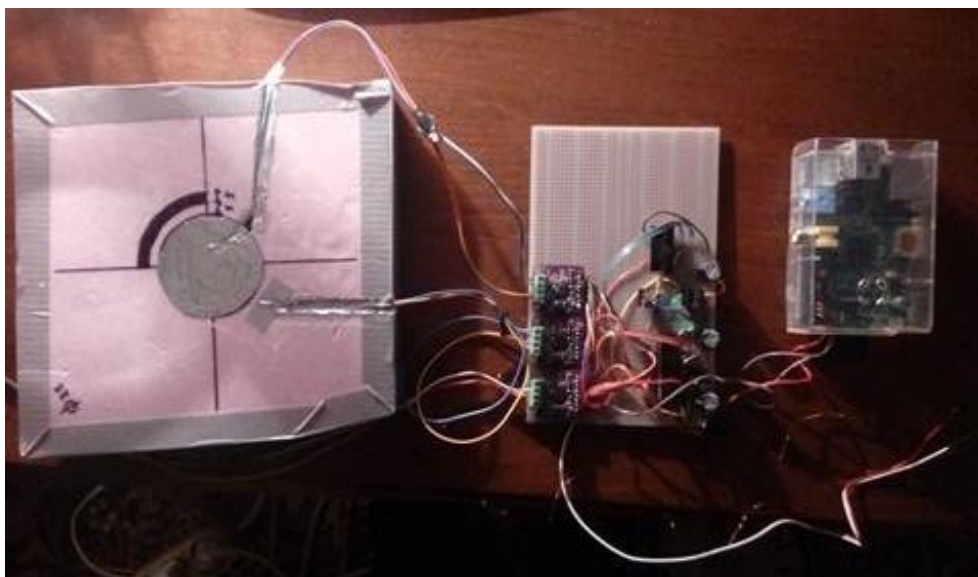
## 2.1.4 Měřicí sonda

Materiál, ze kterého se skládá sonda, která obsahuje teplotní čidla a zdroj tepelné energie, je tvrdý měkčený polyuretan se známými vlastnostmi pro případ měřicího ústrojí Kateřina. Tento materiál byl zvolen pro své tepelně izolační vlastnosti, snadnou zpracovatelnost a nízkou hodnotu objemové hmotnosti. Uspořádání geometrie tepelného zdroje bylo původně zvoleno jako kruhové, přičemž se odečítala teplota na topidle v pravidelných intervalech a zároveň se odečítala teplota ve vzdálenosti 0,5 cm od

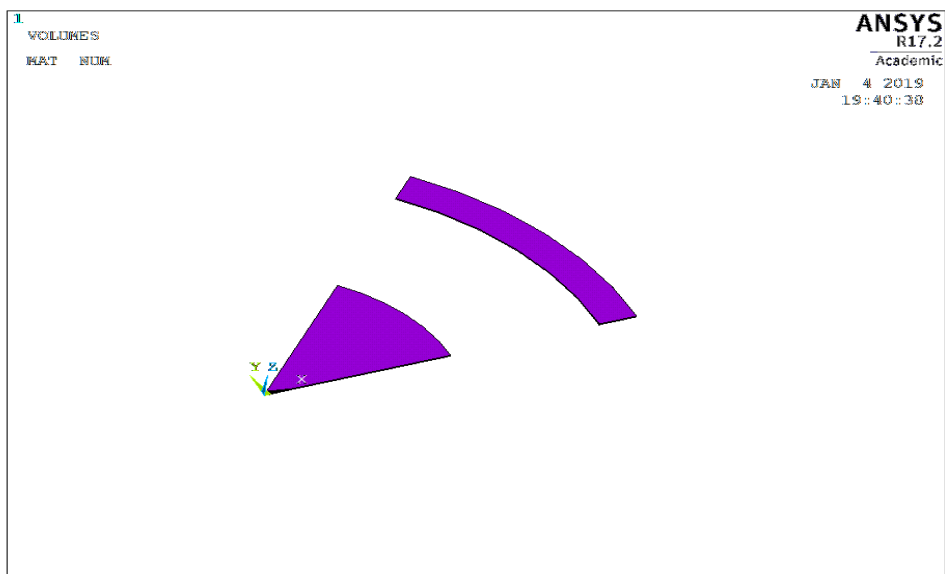
zdroje. Toto uspořádání bylo modifikováno jako zdroj tepla ve tvaru kruhové výseče, na kterém se měří teplota a tepelná plocha ve výseči, ve tvaru kruhu, na které se opět odečítá teplota. Průměr mezikruží byl zvolen s vnější částí 5 cm a vnitřní částí 4,5 cm, vnitřní část plochy pak má průměr 4 cm. Zdroj tepla je ve skutečnosti velmi tenký, lakovaný drát se stanoveným odporem  $2,4 \Omega$  na m o délce 3 m, který je přidělán na plochu s velmi vysokou hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Topný drát není příliš poddajný, proto je ve výsledku menší rozměrová odchylka od původní geometrie.



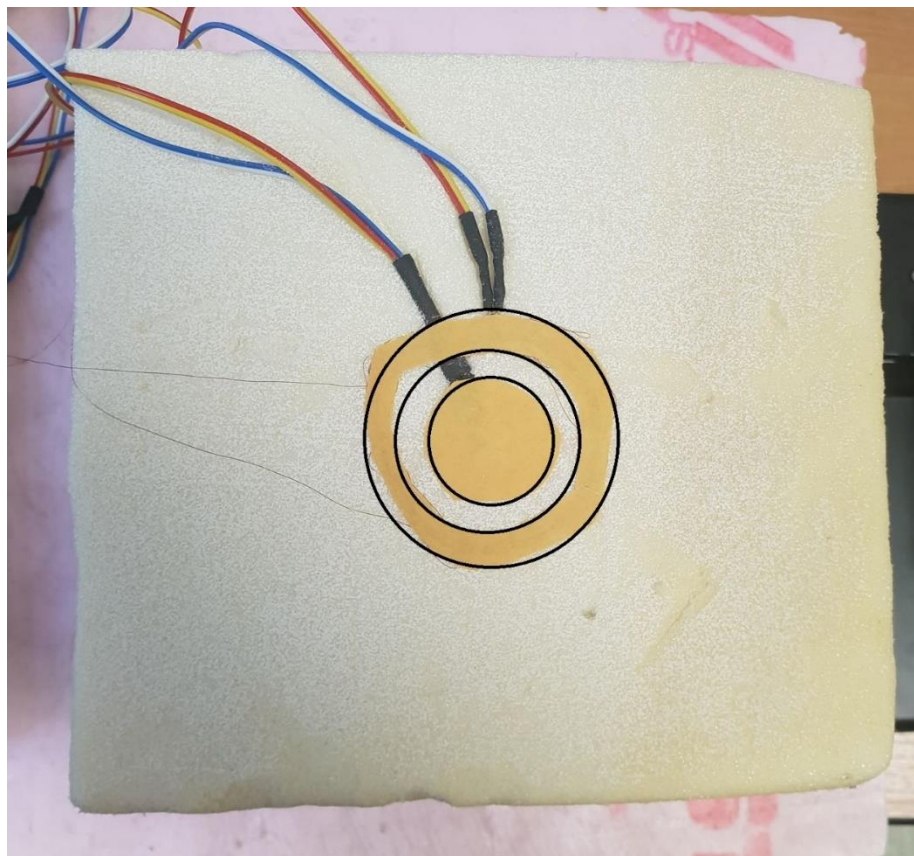
Obrázek 25: Schéma měřicí sondy v softwaru ANSYS [6]



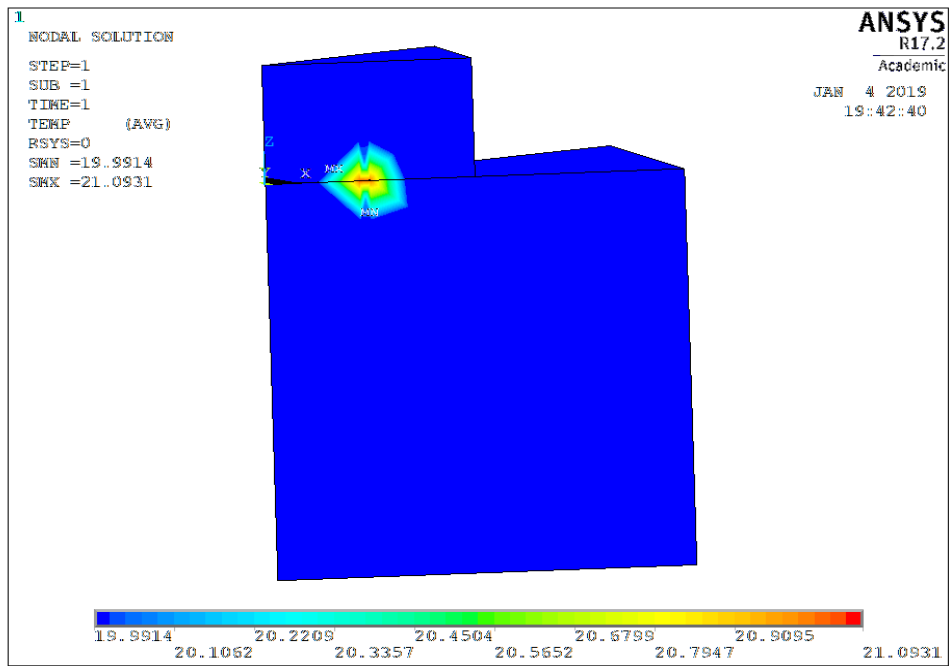
Obrázek 26: Prvotní návrh konstrukce měřidla s Raspberry Pi 2 [6]



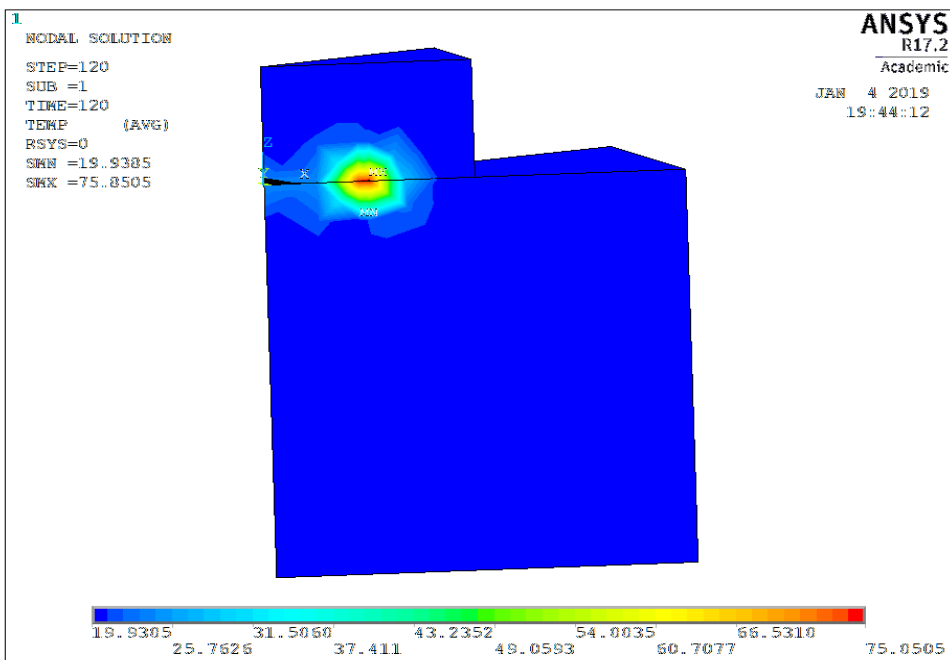
Obrázek 27: Schéma topného zdroje a měřicího čidla v softwaru ANSYS [6]



Obrázek 28: Nejnovější verze měřicí sondy [6]

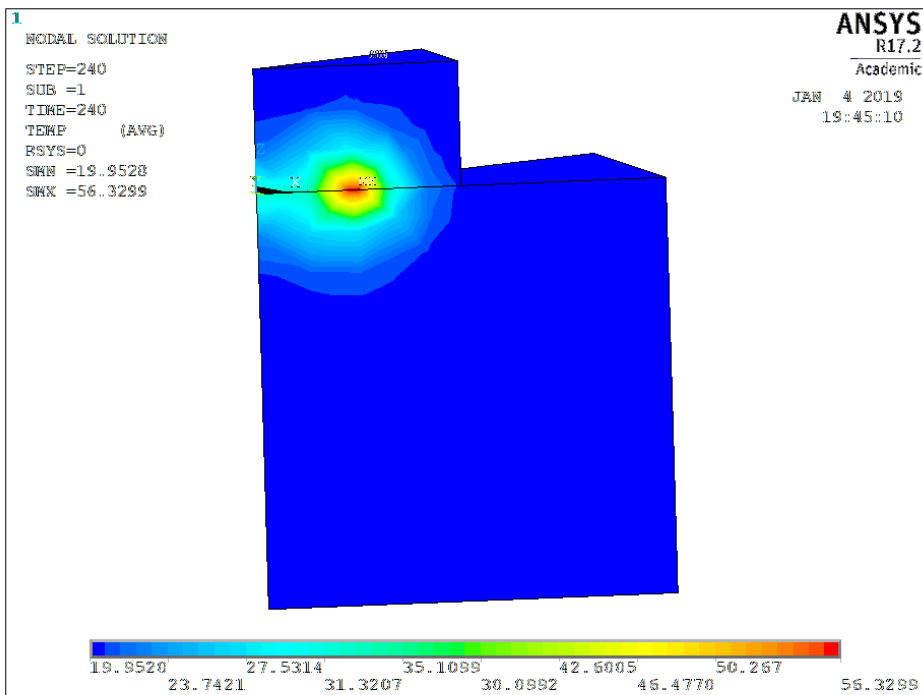


Obrázek 29: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 1 s

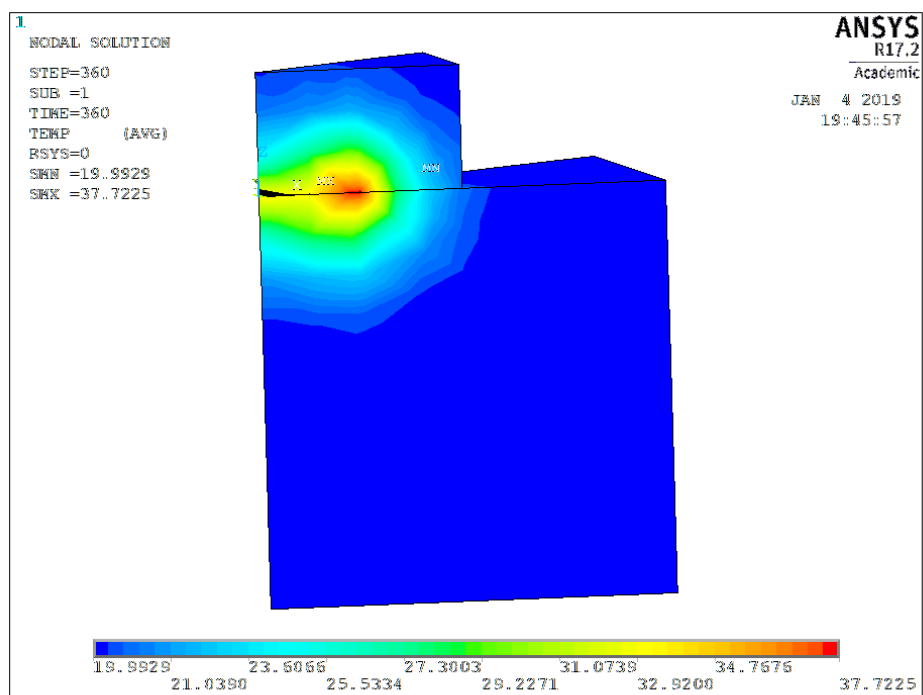


Obrázek 30: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 120 s





Obrázek 31: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 240 s



Obrázek 32: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 360 s

## 2.2 Měřené materiály

### 2.2.1 Minerální izolační deska PURA

Jedná se o materiál vyrobený z čistě přírodního materiálu na bázi písku, vápna a vzduch bez přísad umělé hmoty, vláken, zpěňovačů nebo přísad hliníku. Vnik pórovité struktury je docílen zdravotně nezávadnou technologií výroby na bázi účinků proteinů. Právě pórovitá struktura umožňuje, že je deska PURA kapilárně aktivní.

Stavební předpisy vyžadují při stavbě a sanaci kromě tepelné izolace i protipožární vlastnosti. Materiály, které v případě požáru nevyvíjejí kouř ani toxické plyny. Deska redstone PURA, odpovídá třídě reakce na oheň A1 podle ČSN EN 13 501-1, při styku s ohněm se neuvolňují nebezpečné plyny.

Vnitřní zateplení s redstone PURA zvyšuje vnitřní povrchovou teplotu stěny a snižuje tak kromě tepelných ztrát také nebezpečí tvorby plísní a eliminuje účinky tepelných mostů.

Vedle vynikajících tepelně-izolačních vlastností (součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  je téměř totožný s fasádním polystyrénem a fasádní kamennou vlnou) je PURA kapilárně aktivní. Kapilární aktivita materiálu umožní pojmout rychle velké množství případně vzniklého kondenzátu (může vzniknout v chladných měsících roku) a rychle transportovat kondenzát mimo konstrukci tak, že není nutno používat parozábranu. PURA je 100% své kapilárně aktivní plochy v kontaktu s podkladem, tzn. 100% plochy vstřebává a odvádí kondenzát směrem od konstrukce do interiéru. Předpokladem správné funkce systému je i normální větrací režim v místnosti. Deska má účinný zvukový útlum.

PURA je odolná proti korozi, účinkům hmyzu a proti hlodavcům, při poklepu se nejeví jako dutý materiál.

Před provedením zateplení se provádí odborný návrh zateplení s ohledem na dispozici bytu včetně detailů napojení na konstrukce a počítačových výpočtů tepelné a vlhkostní bilance pomocí programu COND, s cílem navrhnout optimální složení zateplení a eliminovat vlivy případných tepelných mostů.

Izolační deska PURA se nalepí systémovou lepicí maltou na vnitřní líc zdiva.

Řezání desky pilkou, vrtání otvorů a přizpůsobení desky rozměrově je velice jednoduché a lehce proveditelné díky lehké konstrukci desky.

Povrchová úprava se provádí vyztuženou stěrkou nebo nalepenou univerzální sanační deskou USP a následným nátěrem silikátovou či vápennou nátěrovou hmotou, omítkou (vápennou, silikátovou, hliněnou,...). Mnozí pokládají vnitřní zateplení za rizikové. „Přesun rosného bodu do konstrukce“ vyvolává obavy z poruch konstrukce. Výpočty podle normy tyto obavy ještě umocňují.

Na druhé straně není mezi stavebními fyziky dostatečně známo, že kalkulace dle normy, nevypovídá o skutečných procesech v konstrukci. Při správně provedeném vnitřním zateplení pracuje v chladných měsících roku zateplovací systém kontaktně připevněný na stavební konstrukci v režimu vlhkosti řádově okolo 0,5 %<sup>hm</sup>. Pro srovnání, v omíтке jsou 4 % - 6 %<sup>hm</sup> vody a tento stav je normální.

Systém redstone PURA představuje ověřenou a špičkovou kvalitu v moderních systémech vnitřního zateplení akceptujících vznik kondenzátu.

V současné době převážně používaná Glaserova teoretická metoda výpočtu množství kondenzátu (vlhkostní bilance) v konstrukci při vnitřním zateplení dokazuje, že v konstrukci se nahromadí takové množství kondenzátu, že je lépe rezignovat na vnitřní zateplení nebo použít parozábranu. Na Glaserovu metodu je pohlíženo jako na metodu statickou, nezahrnující prvky dynamických procesů v konstrukci při transportu vlhkosti, tzn. kapilární vlastnosti materiálů. U kapilárně aktivních materiálů je v současnosti možno namodelovat a vypočítat vlhkostní bilanci pouze na programech COND, DEPLHIN a WUFI. Pouze tyto programy mají v sobě zahrnuty algoritmy vlastností kapilárně aktivních materiálů. V současnosti v České republice nejvíce používané programy TEPLO a PROTECH dovedou správně spočítat teplotní bilanci vnitřního zateplení, ale vlhkostní bilance je počítána podle Glaserovy výpočtové metody neuvažující s kapilární aktivitou materiálu. Proto je nutno případnou tepelnou bilanci provedenou na programech TEPLO a PROTECH u kapilárně aktivních materiálu doplnit o vlhkostní bilanci jednoho z programů COND, DEPLHIN nebo WUFI.

Současně s laboratorními pokusy v 80. letech položil K. Kießel základy novým komplexním výpočetním programům. Na problematiku transportu vlhkosti je pohlíženo jako na komplexní a dynamický proces v konstrukci stavby.

Petr Häupel z technické univerzity v Drážďanech pracoval v téže době na podobném projektu obdobně jako i v jiných evropských zemích. Všechny t.č. nové metody mají společné jmenovatele:

- Metodika výpočtů není stacionární proces, pracuje s reálnými daty v časově dynamickém kontextu,
- Vedle difuze vodních par je přihlíženo ke schopnosti uložit dočasně vlhkost v materiálu a k transportu vody díky kapilárnímu vedení a kapilárnímu zadržování vody v materiálu,
- Schopnost získat v jakýkoli časový okamžik data popisující teplotní a vlhkostní profil v řezu konstrukce (zdi) a to i po dobu několikaletých cyklů.

Výpočty prováděné Glaserovou metodou jsou v praxi správné tam, kde jsou používány nehydroskopické materiály (materiály, které nejsou schopny na sebe vázat vodu) a tam, kde se jedná pouze o jednoduché zjištění difuzní bilance – v těchto případech se norma osvědčila.

Zjednodušeně možno tvrdit, že transport vody v hydroskopických materiálech se uskutečňuje pomocí pórovitých komůrek v materiálu dvěma základními způsoby:

- Kapilární sání ve vodou naplněných pórech (síla je povrchové kapilární napětí vody),
- Vedení vody ve formě vlhkého filmu na povrchu velkých pórů v materiálu (síla je daná rozdílem relativní vlhkosti na obou stranách póru).

Kapilární sání funguje v praxi mnohem více a častěji než difuzní transport vodní páry. I v „suchých“ materiálech je určité množství pórů stále zaplněno vodou. Jednotlivé póry vytváří „sít“, která umožňuje transport dodatečně vytvořené vody (např. při vytvoření kondenzátu) na principu sání vody a dodatečného dalšího vedení vody – dynamický proces.

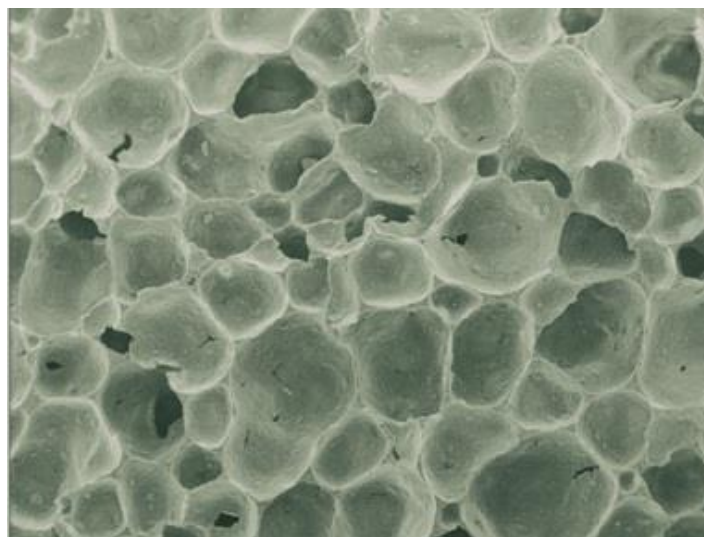
Pohyb vody ve formě vlhkého filmu na povrchu minerálních materiálů byl vědecky popsán jako skutečný transportní proces v 90. letech na Fraunhoferově institutu pro stavební fyziku v Holzkirchenu. V tomto smyslu nabývá na významu i zbytková voda v rozích pórů. Co do množství odvedené vlhkosti formou vlhkého filmu je toto množství řádově totožné jako při difuzi vodní páry.

Fyzikální procesy v kapilárně aktivních materiálech podrobně objasňují teorie entalpie.

Díky tomu, že je deska vyrobena z čistě přírodního materiálu, je s odpadem nakládáno jako s normálním stavebním odpadem. PURA není klasifikována jako nebezpečný materiál. Je testována a plně vyhovuje podmínkám ekologické udržitelnosti [19].



Obrázek 33: Deska PURA [19]



Obrázek 34: mikrostruktura desky PURA [19]

## 2.2.2 EPS Expandovaný polystyren

Polystyrén je umělá hmota, pevný, snadná lámavý a levný plast, který vzniká jako produkt polymerace styrenu. Do skupiny polystyrénových hmot patří standardní polystyrén (krystalový), houževnatý polystyrén, vytlačovaný polystyrén (XPS), zpěňovaný polystyrén (EPS) a kopolymery.

Nevýhodou polystyrénu je jeho malá tepelná odolnost (při teplotě 70 °C se výrobky z polystyrénu deformují). Mezi hlavní výhody patří snadná zpracovatelnost a nízká hodnota součinitele tepelné vodivosti a nízká nasákavost.

Ve stavebnictví se běžně používá polystyrén zejména v deskách o rozměrech 0,5 x 1 m, tl. dle potřeby. Osvědčil se například v tepelných izolacích domů nejčastěji EPS 70F a EPS 100F – kontaktní zateplovací systém.

Číslo značí pevnost v tlaku v kPa. Písmena za pevností značí:

F – fasádní – pro kontaktní zateplování

S – stabilizovaný – pro tepelné izolace střech

Z – základní – do podlah.

XPS je polystyrén, který se vyrábí extruzí (vytlačováním) taveniny z krystalového polystyrénu za současného sycení vzpěňovadlem, které po uvolnění tlaku umožní na konci vytlačovací hubice napěnění materiálu. Kvůli vysoké hořlavosti plastické hmoty se do ní přidávají bromované zpomalovače hoření, zejména hexabromcyklododekan (HBCD). Zpravidla desky 1250 x 600 mm, nejčastěji s polodrážkou nebo kolmou hranou, pro použití na sokl se zdrsňným povrchem pro lepší přilnutí lepidla (Styrodur). Je nenasákavý o různém barevném provedení.

Použití pro podlahy: Stabilizované izolační desky z pěnového polystyrenu pro těžké i lehké plovoucí podlahy bez požadavků na kročejový útlum. Jsou určeny pro konstrukce s běžnými požadavky na zatížení tlakem a malou deformací (byty, kanceláře, učebny...). Při požadavcích na kročejový útlum je nutno provést vícevrstvou izolaci (zkombinovat tvrdé a měkké izolační desky). Desky jsou vhodné pro izolační vrstvy velkých tlouštěk pro energeticky úsporné domy.

Trvalá zatížitelnost  $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  při deformaci  $< 2\%$  s možností lineární interpolace pro zatížení menší. Po dohodě lze dodat i v jiných tloušťkách a rozměrech.

Pro shodný účel lze použít také desky Isover EPS 100F.

Použití pro ploché střechy: Stabilizované desky pro tepelné izolace konstrukcí s běžnými požadavky na zatížení, např. ploché střechy, podlahy apod. Trvalá zatížitelnost v tlaku max.  $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  při deformaci  $< 2\%$  s možností lineární interpolace pro zatížení menší. Po dohodě lze dodat i v jiných tloušťkách a rozměrech [21].



Obrázek 35: Deska z polystyrénu [21]

### 2.2.3 CLIMA PLUS izolační deska

Clima Plus je izolační a sanační deska pro vnitřní použití. Sanační desky Clima Plus jsou vyrobeny z křemičitanu vápenatého. Mikroporézní kapilárně aktivní struktura umožňuje difúzi vodních par a kapilární vedení vody. Desky jsou schopny absorbovat více než dvojnásobek vlastní hmotnosti vody bez deformace. Při klesající relativní vlhkosti je tato voda odevzdávána zpět do vzduchu v místnosti. Povrch přitom zůstává suchý a je trvale zabráněno tvorbě plísní. Vlastnosti regulace vlhkosti zajišťují zdravé a příjemné klima v místnosti. Tepelně izolační vlastnosti desky zvyšují teplotu povrchu vnitřní stěny a zabraňují vzniku kondenzátu. Sanační desky Clima Plus neobsahují minerální vlákna, azbest, formaldehyd ani freony. Desky jsou nehořlavé – třída reakce na oheň A1. Montáž je snadná díky přímému lepení na plochy stěn. Sanační desky

Clima Plus se používají k vnitřnímu zateplení, pro regulaci vlhkosti vzduchu a klimatu v místnosti a pro zamezení tvorby plísní v důsledku vnitřní kondenzace. Desky slouží k vnitřní tepelné a zvukové izolaci, sanaci stěn nasáklých kondenzovanou vodou, rekonstrukci prostorů po poškození ohněm, vodou a plísněmi. Desky je možno použít na sanaci vlhkosti zdiva, které není postiženo silnými výkvěty solí a jejich hmotností vlhkost je maximálně do 10 %. Trvalé stavební škody, např. vadná horizontální izolace nebo netěsnost fasády, musí být v každém případě odstraněny. Desky se lepí na jakýkoli čistý, nosný a rovný podklad odolný vůči vlhkosti, jako je zdivo, beton, pevné starší omítky, nosné starší nátěry a vrstvy (ne na dřevo nebo tapety) [19].

Tabulka 8: Deklarované vlastnosti desky CLIMA PLUS [19]

Formát:	1,200 x 750 mm
Objemová hmotnost:	0,36 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v ohybu za sucha (hodnota zlomu):	1,1 N/mm <sup>2</sup>
Pevnost v tlaku:	1,6 N/mm <sup>2</sup>
Deformace při 50 % až 90 % relativní vlhkosti vzduchu:	0,01 %
Součinitel difuzního odporu:	$\mu = 5$
Hodnota pH:	cca 9 až 10
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,070 \text{ W}/(\text{mK})$
Třída reakce na oheň:	nehořlavá A1





Obrázek 36: Deska CLIMA PLUS a její aplikace [19]

## 2.2.4 Konopná izolace

Konopná izolace je ekologický přírodní izolační materiál z technického konopí, který má vynikající tepelné izolační vlastnosti. Konopná izolace je vhodná pro zateplení střech, stropů, podlah a zdí. Díky zhotovení rohoží na míru se čas montáže rapidně snižuje. Konopná izolace může být lepena i kukuřičným škrobem a proto mohou být 100% BIO, díky energeticky nenáročné výrobě je konopná izolace maximálně šetrná k přírodě. Celkový vznik CO<sub>2</sub> při výrobě jednoho m<sup>3</sup> izolace z konopí je menší než CO<sub>2</sub>, které konopí odbourává při svém růstu, takto má konopná izolace unikátně pozitivní CO<sub>2</sub> bilanci mezi izolačními hmotami [22].



Obrázek 37: Deska z konopné izolace [22]

### 2.3 Způsob zpracování naměřených hodnot

Vyhodnocení výsledků v současné době probíhá pomocí softwaru ANSYS. Software ANSYS je pokročilý výpočetní software, který slouží k vytvoření teoretických modelů chování vnitřního energetického systému. V praxi to znamená, že zde můžeme vytvořit teoretický model konstrukce a pozorovat šíření teplotní vlny celým systémem, pokud zde vytvoříme zdroj tepelné energie.

Pokud do softwaru ANSYS zadáme parametry materiálu, tj. součinitel tepelné vodivosti, tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost a zároveň zadáme výkon a charakter topného systému (výkon, čas, rozměry topidla), můžeme zde pozorovat, jak se v systému výpočtově šíří tepelná energie, resp. teplotní vlna. Jestliže známe charakter šíření teplotní vlny systémem teoreticky a zároveň pak máme k dispozici materiál, který má stejnou objemovou hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a tepelnou kapacitu a zároveň pokud máme stejný zdroj tepla, tj. víme jak se zde reálně šíří teplotní vlna, jsme schopni pomocí metody zpětného modelování získat přibližné hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity.

Je zřejmé, že hodnota součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity konverguje k její konečné velikosti, pokud v teoretickém modelu v softwaru ANSYS budeme měnit hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity, bude se měnit průběh šíření

teplotní vlny. Znamená to tedy, že se snažíme najít průběh šíření teplotní vlny, který pro diferenci obou případů šíření vln (teoretický model i praktický model) konverguje k hodnotě 0. Vždy tedy začínáme odhadem na určitém intervalu a metodou bisekce (půlení intervalů) se snažíme konvergovat ke konečné hodnotě. Jak ale ze základů matematiky dobře víme, tak metoda bisekce nemá nikdy konečnou hodnotu, a proto tedy i my nebudeme mít přesnou konečnou hodnotu, ale budeme se k ní pouze teoreticky velmi blížit.

Vzhledem k tomu, že pro výpočet tepelné vodivosti  $\lambda$  je nutné používat vyčíslení pomocí softwaru ANSYS, je provádění touto metodou zdlouhavé a pracné. Počet měřených hodnot a tím i délka měřících časových intervalů jsou z důvodu zdlouhavosti výpočtu omezovány, čímž dochází ke snížení přesnosti vyhodnocení.

Přesnost měření je ovlivněna několika faktory, mezi které patří odvod tepla z povrchu vzorku, geometrie a rozměry vzorku, vliv velikosti tepelného zdroje, odvod tepla zdrojem samotným a setrvačností snímače teploty.

## 2.4 Průběh měření

Měření bylo provedeno na skupině vybraných vzorků a každý vzorek byl měřen několikrát, a to z důvodu ověření opakovatelnosti a ověření správnosti měření. Byly vybrány čtyři reprezentativní vzorky stavebních materiálů, a to technické konopí, pórobeton, deska PURA a pěnový polystyrén. Pro další výzkum byly dále měřeny závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu vzorků. Před zahájením měření byly zvoleny následující parametry pro všechna měření:

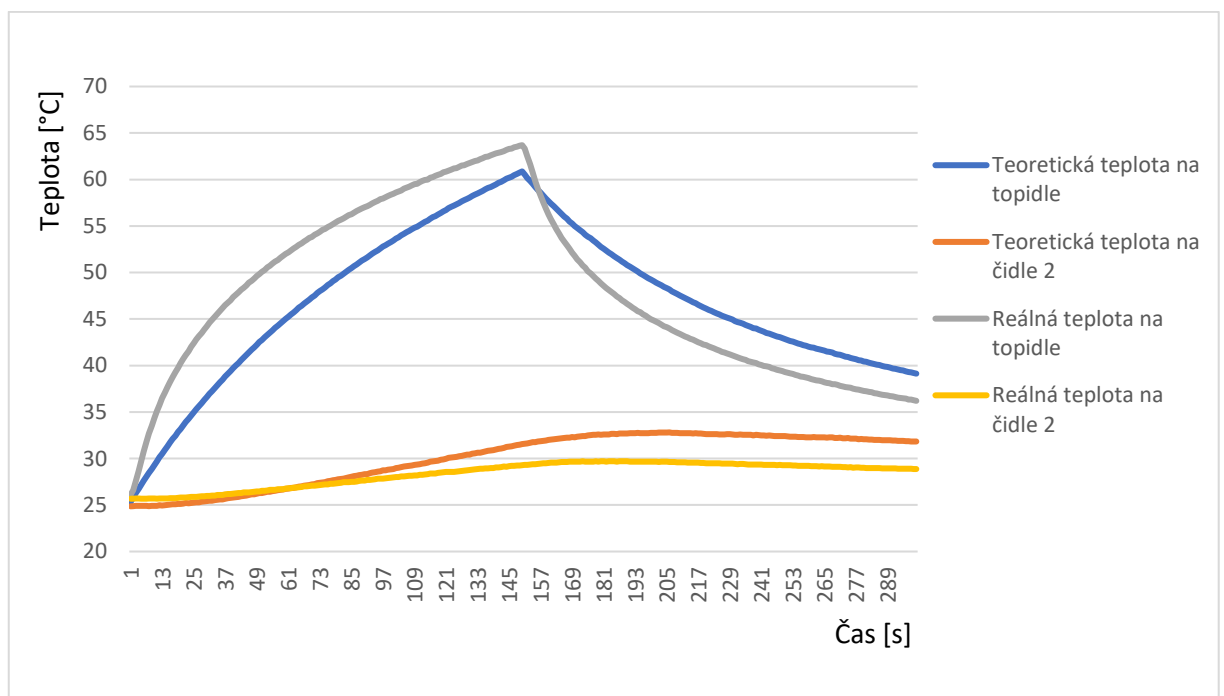
Výkon topidla:	2,0018 Watt
Perioda vzorkování:	0,5 s
Počet vzorků:	300
Délka měření:	300 s, dvě fáze.
Teplota prostředí:	24.6 °C
Datum měření:	3. 12. 2018, 4.12.2018, 6.12.2018, 7.12.2018, 18.12.2018.

Vyhodnocení bylo provedeno pomocí softwaru ANSYS a softwaru Excel.

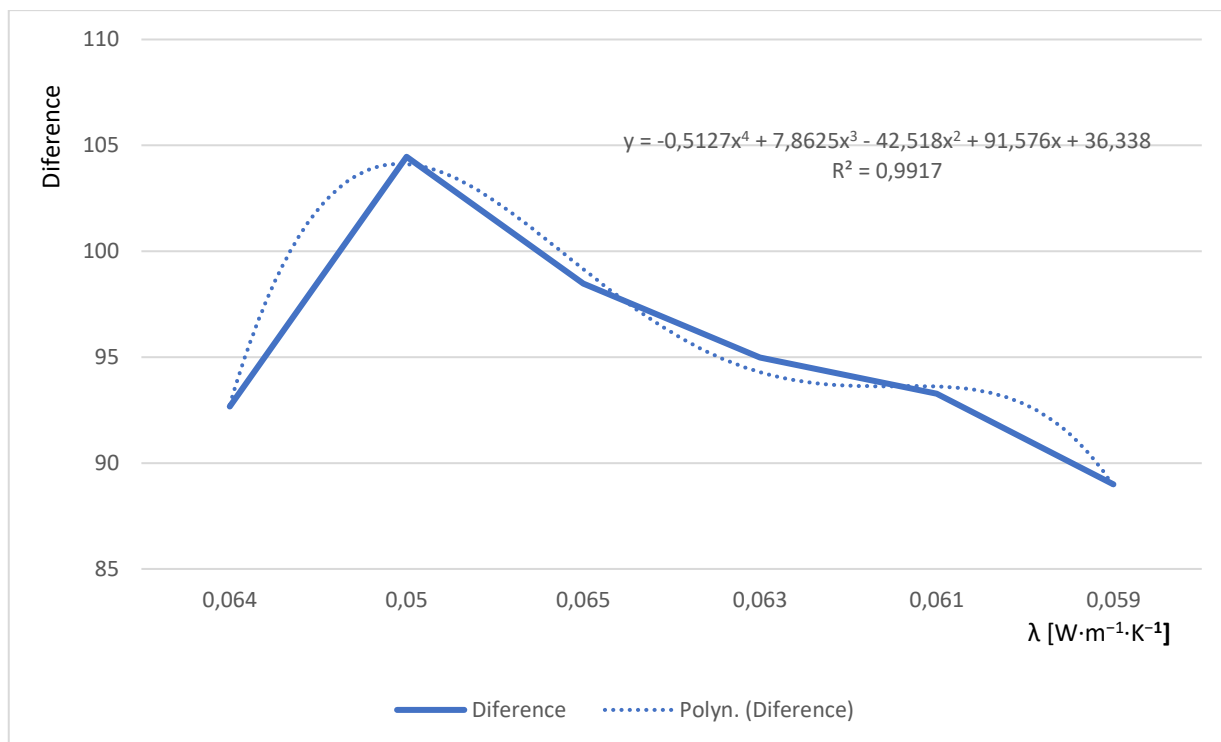
## 2.4.1 Technické konopí

Tabulka 9: Stanovení hodnot součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity bisekcí pro vzorek technického konopí

$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Kvadrát difference	Diference
0,064	2200	116	8589	92,677
0,050	2200	116	10912	104,461
0,063	2200	116	9022	94,984
0,061	2200	116	8699	93,268
0,059	2200	116	7852	88,612
0,055	2200	116	8892	94,297
0,059	2300	116	7942	89,118
0,059	2350	116	8083	89,906
0,059	2400	116	8337	91,307
0,059	2325	116	7972	89,286
<b>0,059</b>	<b>2310</b>	<b>116</b>	<b>7920</b>	<b>88,994</b>



Obrázek 38: Průběh šíření teoretické a reálné teplotní vlny vzorkem technického konopí

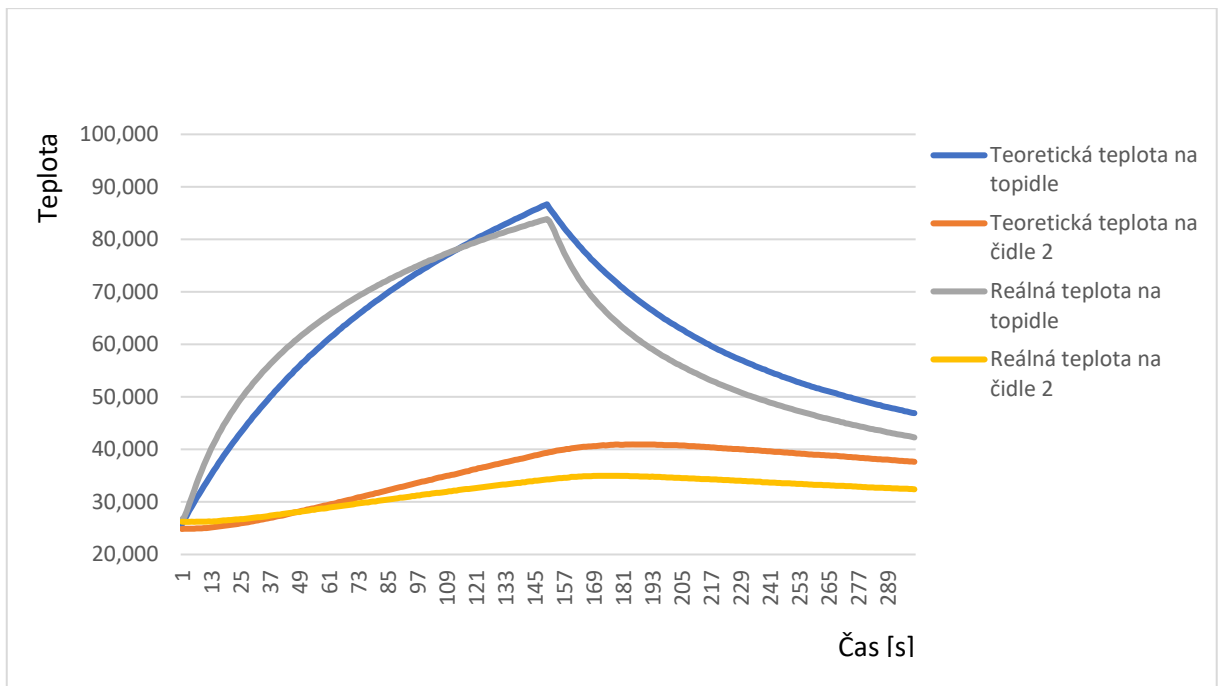


Obrázek 39: Závislost diference na součiniteli tepelné vodivosti

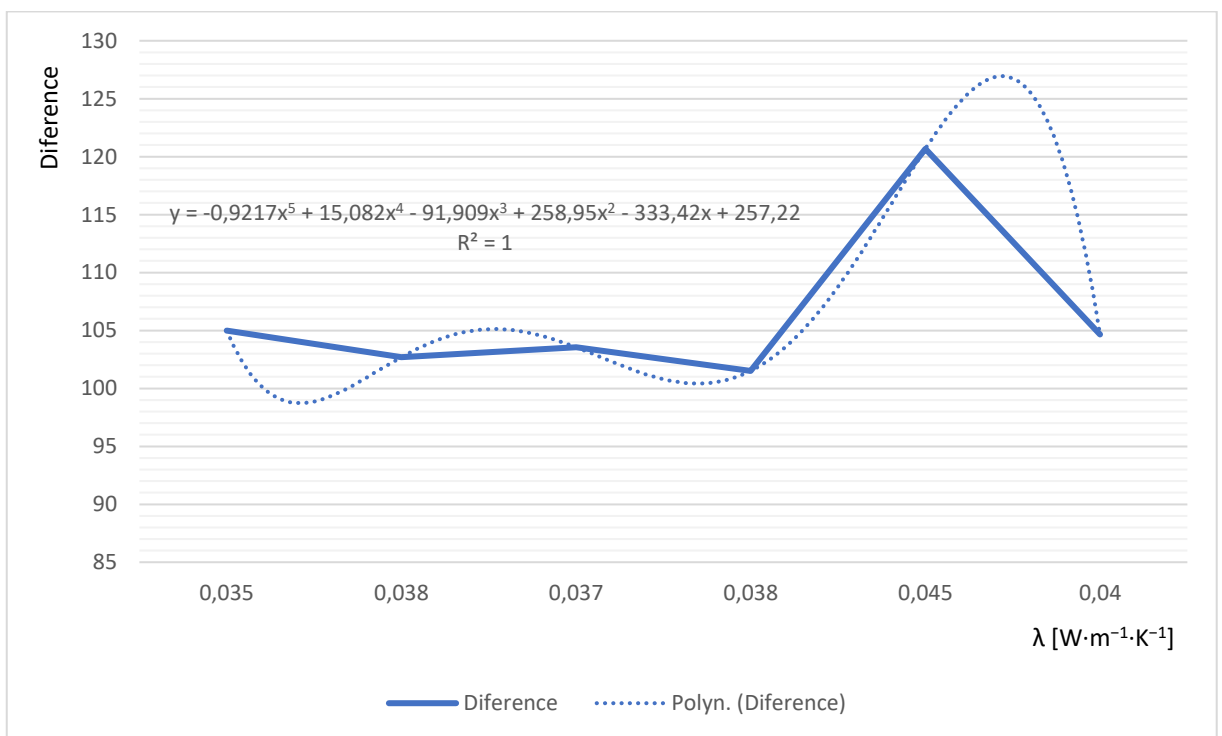
## 2.4.2 Pěnový polystyrén

Tabulka 10: Stanovení hodnot součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity bisekcí pro vzorek pěnového polystyrénu

$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$c$ [J.kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Kvadrát diference	Diference
0,035	1200	41	11023	104,990
0,038	1200	41	10546	102,694
0,037	1200	41	10722	103,547
0,038	1250	41	10569	102,806
0,045	1250	41	14562	120,673
0,038	1400	41	13157	114,704
0,04	1250	41	10953	104,657
0,038	1100	41	10752	103,692
<b>0,038</b>	<b>1225</b>	<b>41</b>	<b>10304</b>	<b>101,509</b>
0,038	1210	41	10596	102,937



Obrázek 40: Průběh šíření teoretické a reálné teplotní vlny vzorkem pěnového polystyrénu



Obrázek 41: Závislost diference na součiniteli tepelné vodivosti

Ze získaných výsledných hodnot je patrné, že dominantním parametrem při vyhodnocování výsledků je součinitel tepelné vodivosti a tepelná kapacita slouží jen ke korekci výsledné hodnoty. Pro vzorek technického konopí jsme zvolili počáteční hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $0,060 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnotu tepelné kapacity  $2200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Při snižování hodnoty součinitele tepelné vodivosti se kvadrát diference

zvyšoval až do hodnoty  $0,059 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Při zvyšování hodnoty součinitele tepelné vodivosti nad hodnotu  $0,0600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  se kvadrát difference zvyšoval vždy, a proto jsem přisoudil hodnotu součinitele tepelné vodivosti pro tento vzorek  $0,0590 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Při zvyšování hodnoty tepelné kapacity se snižoval a difference až do  $2310 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , poté se opět kvadrát difference zvyšoval, a proto jsem usoudil, že hodnota tepelné kapacity je  $2310 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

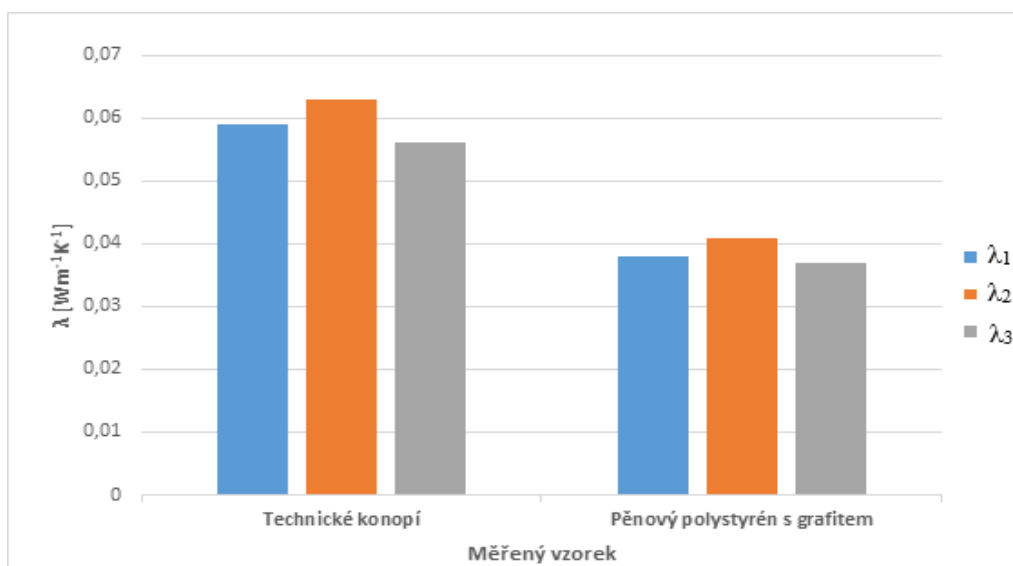
Pro vzorek pěnového polystyrénu jsme stejným způsobem usoudili hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnotu tepelné kapacity  $1225 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pro vzorek dřeva byla zjištěna hodnota součinitele tepelné vodivosti  $0,193 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnota tepelné kapacity  $2300 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Parametry technického konopí a pěnového polystyrénu udávané výrobcí jsou uváděny v tabulce 1. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti technického konopí se značně liší z důvodu vyšší hodnoty objemové hmotnosti měřeného vzorku.

Tabulka 11: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity získané metodou zpětného modelování

Vzorek	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Technické konopí	0,059	118	2310
Pěnový polystyrén s grafitem	0,038	43	1225
Dřevěná deska s přirozenou vlhkostí. Směr tepelného toku: kolmo k vláknům	0,193	419	2300

Tabulka 12: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti získané metodou zpětného modelování, přístrojem Shoterm a přístrojem Isomet 2104

Vzorek	$\lambda_1$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_2$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_3$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Technické konopí	0,059	0,063	0,056
Pěnový polystyrén s grafitem	0,038	0,041	0,037



Obrázek 42: Sloupcový graf porovnání stanovených hodnot součinitele tepelné vodivosti metodou zpětného modelování, přístrojem Shoterm a přístrojem Isomet 2104

kde  $\lambda_1$  je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná metodou zpětného modelování,

$\lambda_2$  je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná přístrojem SHOTHERM,

$\lambda_3$  je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná přístrojem ISOMET.

## 2.5 Stanovení závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu vzorků

Pro ověření funkčnosti přístroje s označením Kateřina byly dále měřeny vzorky v určitém vlhkostním stavu pro stanovení vlhkostních závislostí součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu vzorků. Byly vybrány čtyři reprezentativní vzorky v závislosti na jejich nasákavosti, a to deska PURA a pěnový polystyrén.



Každé měření proběhlo na samostatném vzorku, který byl po stanovenou dobu (24 hodin) uložen v izolovaném prostředí s určitou dávkou vody, po měření byl vysušen v sušárně při 105 °C do konstantní hmotnosti a byla stanovena procentuální hmotnostní vlhkost při měření.

## 2.5.1 Deska PURA

Tabulka 12: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

w = 0 % ρ = 122,4 kg.m <sup>-3</sup>	λ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	kvadrát diference	Diference	w = 1,6 % ρ = 124,2 kg.m <sup>-3</sup>	λ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	kvadrát diference	Diference
	0,05000	16701	129,2323		0,05000	17001	130,3878
	0,04400	12224	110,5622		0,04000	12524	111,9106
	0,04500	11400	106,7707		0,04500	11700	108,1665
	0,07500	9247	96,16132		0,07500	9547	97,70875
	0,04600	11240	106,0188		0,04600	11280	106,2073
	0,04700	6835	82,67405		0,04700	10135	100,6727
	0,04650	9631	98,13765		0,04770	9431	97,11333
	0,04680	6430	80,18728		0,04800	6730	82,03652
	0,04685	4982	70,58328		0,04685	6282	79,25906
<b>0,04690</b>	<b>4274</b>	<b>65,37583</b>	<b>0,04820</b>	<b>4574</b>	<b>67,63135</b>		

Tabulka 13: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

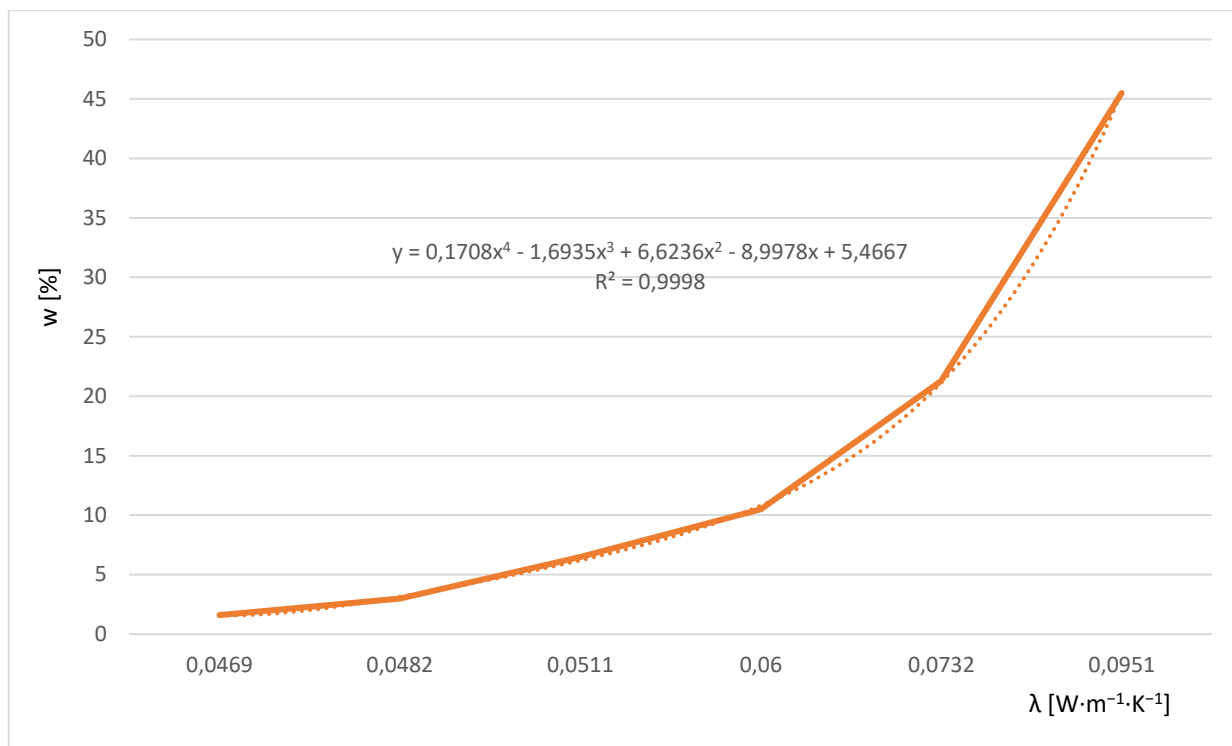
w = 3 % ρ = 123,8 kg.m <sup>-3</sup>	λ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	kvadrát diference	Diference	w = 6,5 % ρ = 130,3 kg.m <sup>-3</sup>	λ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	kvadrát diference	Diference
	0,0550	22524	150,0799		0,0500	27001	291,24928
	0,0530	21700	147,3091		0,0550	24524	277,56876
	0,0450	19547	139,8105		0,0530	25700	284,14597
	0,0480	11540	107,4243		0,0580	8547	163,86333
	0,0520	6135	78,32624		0,0590	5540	131,92582
	0,0510	5431	73,69531		0,0600	4135	113,97581
	<b>0,0511</b>	<b>3730</b>	<b>61,07372</b>		<b>0,0611</b>	<b>3431</b>	<b>103,82102</b>
-	-	-	0,0612	3530	105,30822		

Tabulka 14: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

$w = 10,5 \%$ $\rho = 135,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference	$w = 21,3 \%$ $\rho = 148,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference
	0,0600	29001	301,84322		0,0600	37201	341,86311
	0,0550	34524	329,33318		0,0700	25624	283,72552
	0,0650	15100	217,80278		0,0800	15107	217,85325
	0,0680	13547	206,2987		0,0900	8339	161,85716
	0,0700	11640	191,22798		0,1000	8476	163,18131
	0,0750	8535	163,74826		0,0950	3086	98,462962
	0,0725	3636	106,87764		0,0960	3684	107,58079
	0,0730	3437	103,91176		0,0955	3176	99,888429
	0,0735	3537	105,41259		0,0953	3136	99,257416
	<b>0,0732</b>	<b>3235</b>	<b>100,81196</b>		0,0951	3112	98,876875
	-	-	-		<b>0,0952</b>	<b>3123</b>	<b>99,051471</b>

Tabulka 15: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

$w = 45,5 \%$ $\rho = 182,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference	$w \text{ [%]}$	$\lambda \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
	0,08	28140	297,3288	0	0,0469
	0,09	15534	220,91062	1,6	0,0482
	0,1	8673	165,06675	3	0,0511
	0,11	6436	142,19455	6,5	0,0600
	0,12	6636	144,38701	10,5	0,0732
	0,115	3463	104,30405	21,3	0,0951
	0,1155	3644	106,99516	45,5	0,1148
	0,1145	3399	103,33573	-	-
<b>0,1148</b>	<b>3080</b>	<b>98,367197</b>	-	-	



Obrázek 44: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu desky PURA

## 2.5.2 Deska CLIMA PLUS

Tabulka 16: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

$w = 0,0 \%$ $\rho = 318,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference	$w = 2,5 \%$ $\rho = 326 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference e	Diference
		0,0500	26695		163,386		0,0600
	0,0550	14499	120,4118		0,0590	17593	132,6386
	0,0585	7632	87,36132		0,0610	8756	93,5735
	0,0600	8198	90,54281		0,0620	4115	64,14827
	0,0590	4782	69,15201		0,6150	4299	65,56676
	0,0595	6254	79,08224		0,6170	2998	54,754
	0,0593	5218	72,23573		0,6160	3579	59,82474
	<b>0,0591</b>	<b>4533</b>	<b>67,32756</b>		-	-	-
	0,0592	5163	71,85402				

Tabulka 17: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

$w = 5,9 \%$ $\rho = 354 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference	$w = 13,5 \%$ $\rho = 367 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference
	0,0620	18089	134,4954		0,070	31053	176,2186
	0,0650	12293	110,8738		0,080	20090	141,7392
	0,0700	9844	99,21693		0,090	8999	94,86306
	0,0680	4637	68,09552		0,1000	16667	129,1007
	0,0690	5366	73,25299		0,0950	9576	97,85704
	0,0685	3421	58,48932		0,0920	4023	63,42712
	0,0683	3652	60,43178		0,0915	5312	72,88347
	0,0684	3328	57,68882		0,0921	3694	60,77829
	-	-	-		0,0922	4158	64,48256

Tabulka 18: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

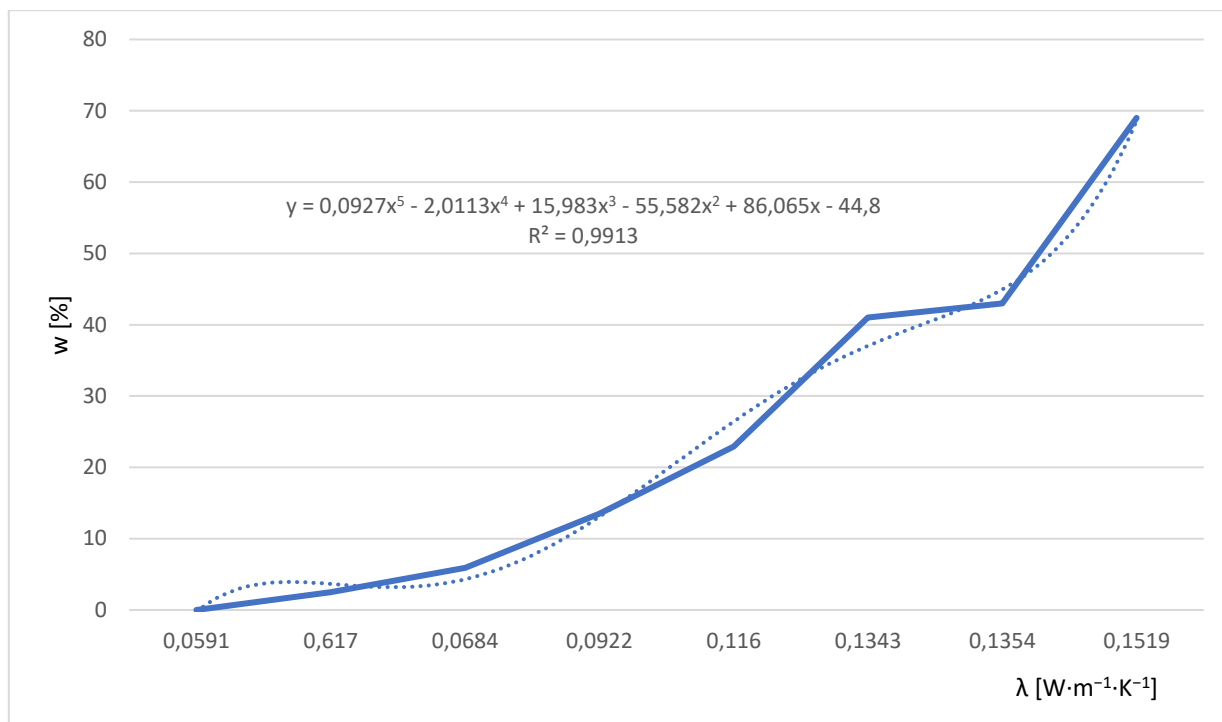
$w = 22,9 \%$ $\rho = 410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference	$w = 41 \%$ $\rho = 455 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	kvadrát diference	Diference
	0,090	17974	134,0671		0,1100	27411	165,5627
	0,100	6995	83,63612		0,1200	13562	116,456
	0,150	9972	99,8599		0,1300	7896	88,85944
	0,120	4398	66,31742		0,1400	8639	92,94622
	0,115	3426	58,53204		0,1350	5799	76,15117
	<b>0,116</b>	<b>3283</b>	<b>57,29747</b>		0,1340	4824	69,45502
	0,117	3691	60,7536		0,1342	3657	60,47313
	-	-	-		0,1345	3896	62,41795
	-	-	-		<b>0,1343</b>	<b>3258</b>	<b>57,07889</b>
-	-	-	0,1344	3483	59,01695		

Tabulka 19: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference		$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference
	$w = 43 \%$ $\rho = 459 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,1350	7695		87,72115	$w = 69 \%$ $\rho = 535 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,1300
0,1360		7793	88,27797	0,1400	14223		119,2602
0,1355		3786	61,53048	0,1500	6823		82,60145
0,1353		3885	62,32977	0,1600	11253		106,0802
<b>0,1354</b>		<b>3357</b>	<b>57,93962</b>	0,1550	9021		94,97895
-		-	-	0,1525	4631		68,05145
			0,1510	6896	83,04216		
			0,1520	4226	65,00769		
			0,1515	4863	69,73521		
			0,1518	4032	63,49803		
			<b>0,1519</b>	<b>3769</b>	<b>61,39218</b>		

Tabulka 20: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro dané vlhkosti

w [%]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
0	0,0591
2,5	0,6170
5,9	0,0684
13,5	0,0922
22,9	0,1160
41	0,1343
43	0,1354
69	0,1519



Obrázek 45: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosním stavu desky CLIMA

PLUS

### 2.5.3 EPS 100S

Tabulka 21: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

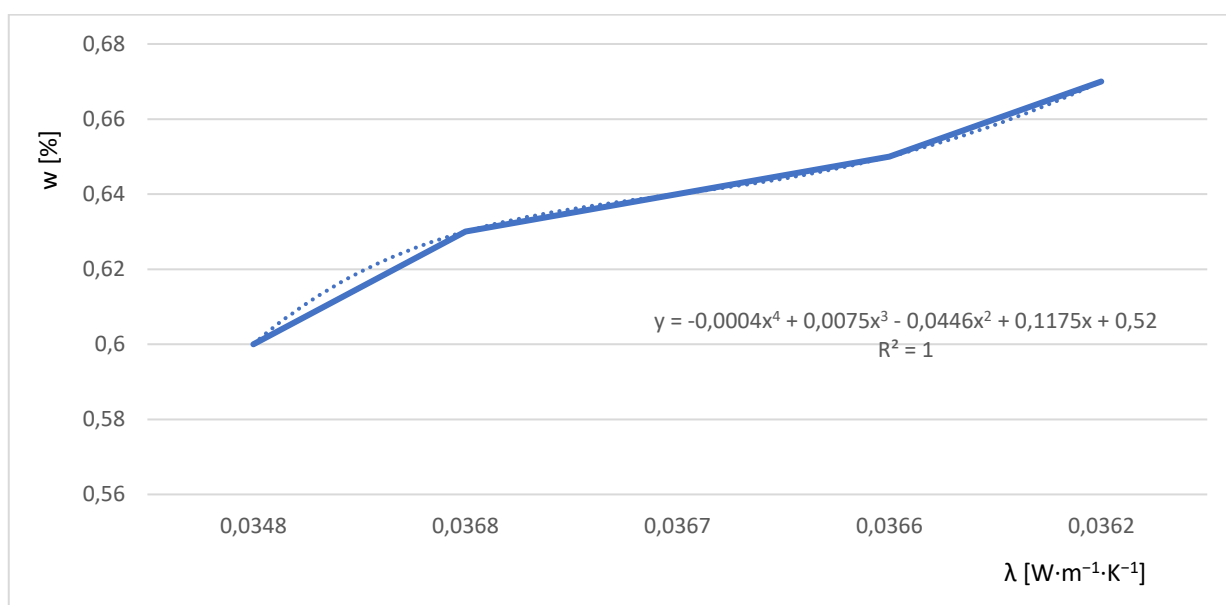
	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference		$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference
	$w = 0,63 \%$	0,0500	23566		153,5122	$w = 0,67 \%$	0,0500
0,0400		18567	136,2608	0,0400	18236		135,0407
0,0300		21588	146,9286	0,0300	21003		144,9241
0,0350		9986	99,92998	0,0350	9148		95,64518
0,0375		8693	93,23626	0,0375	8963		94,67312
0,0360		8796	93,78699	0,0360	5693		75,45197
0,0365		6594	81,20345	0,0365	4693		68,50547
0,0367		6021	77,5951	0,0363	4263		65,29165
<b>0,0368</b>		<b>5463</b>	73,91211	<b>0,0362</b>	<b>4496</b>		67,05222
0,0369		5698	75,4851	-	-		-

Tabulka 22: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

w = 0,64 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference	w = 0,60 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference
	0,035	11278	106,1979		0,037	15278	123,6042
	0,0375	9062	95,19454		0,036	8223	90,68076
	0,036	5988	77,38217		0,035	4653	68,2129
	0,0365	4322	65,74192		0,0355	6365	79,78095
	0,0363	5002	70,72482		0,0345	5998	77,44676
	0,0367	5122	71,56815		0,0348	4722	68,71681
	<b>0,0364</b>	<b>4783</b>	<b>69,15924</b>		<b>0,0349</b>	<b>4032</b>	<b>63,49803</b>
	0,0366	4892	69,94283		-	-	-

Tabulka 23: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

w = 0,65 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference	w [%]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
	0,035	12522	111,9017	0,6	0,0348
	0,036	8426	91,79325	0,63	0,0368
	0,037	7250	85,14693	0,64	0,0367
	0,0365	4266	65,31462	0,65	0,0366
	0,0368	5621	74,97333	0,67	0,0362
	<b>0,0366</b>	<b>4003</b>	<b>63,26927</b>	-	-
	0,0367	4336	65,84831	-	-



Obrázek 46: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkovém stavu EPS 100S

## 2.5.4 EPS 50F

Tabulka 24: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

w = 0,84 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference	w = 0,83 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference
	0,0350	32266	179,6274		0,0390	5422	73,63423
	0,0340	48958	221,2645		0,0389	4998	70,69653
	0,0360	37782	194,3759		0,0387	4221	64,96922
	0,0370	24101	155,245		0,0385	4358	66,01515
	0,0380	12998	114,0088		0,0386	4122	64,2028
	0,0390	3993	63,19019		-		
	0,0400	10157	100,7819				
	0,0395	6668	81,65782				
	0,0393	4976	70,54077				
	<b>0,0391</b>	<b>3802</b>	<b>61,66036</b>				
	0,0392	4112	64,12488				

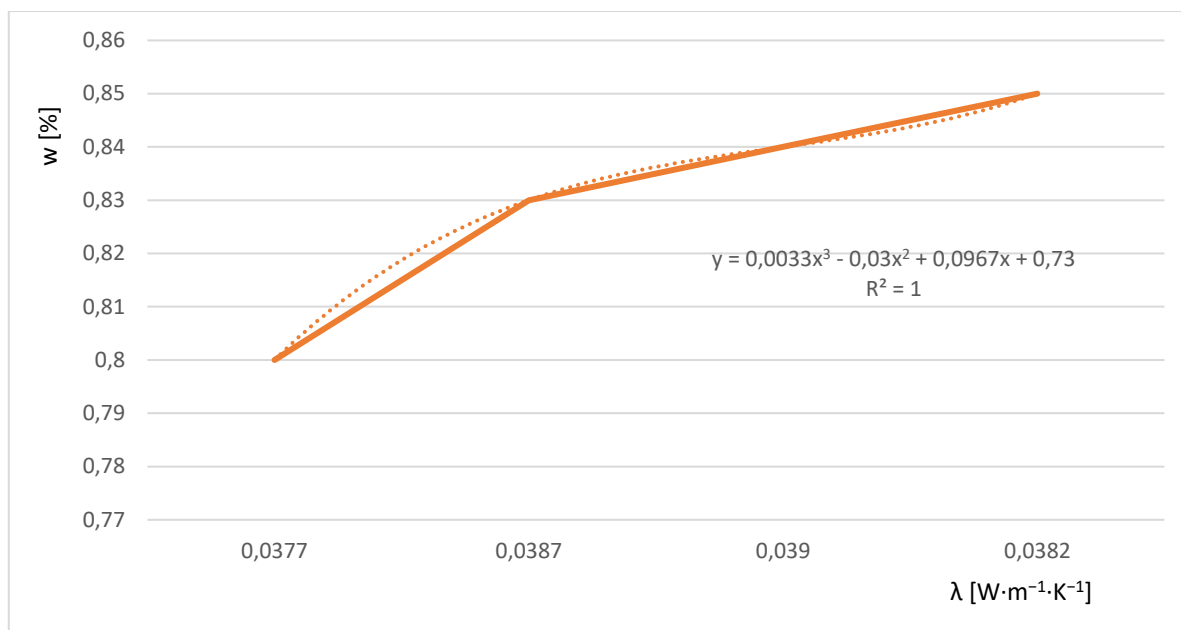
Tabulka 25: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

w = 0,85 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference	w = 0,8 %	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	kvadrát diference	Diference
	0,0390	6144	78,38367		0,0380	7782	88,21564
	0,0389	5963	77,22046		0,0375	7995	89,41476
	0,0387	5401	73,4915		0,0378	4906	70,04284
	0,0385	5033	70,94364		<b>0,0377</b>	<b>4441</b>	<b>66,64083</b>
	0,0383	4232	65,05382		0,0379	4668	68,32276
	<b>0,0382</b>	<b>4456</b>	<b>66,75328</b>		-		
	0,0384	4788	69,19538				



Tabulka 26: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro dané vlhkosti

w [%]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
0,84	0,0391
0,83	0,0386
0,85	0,0383
0,8	0,0377



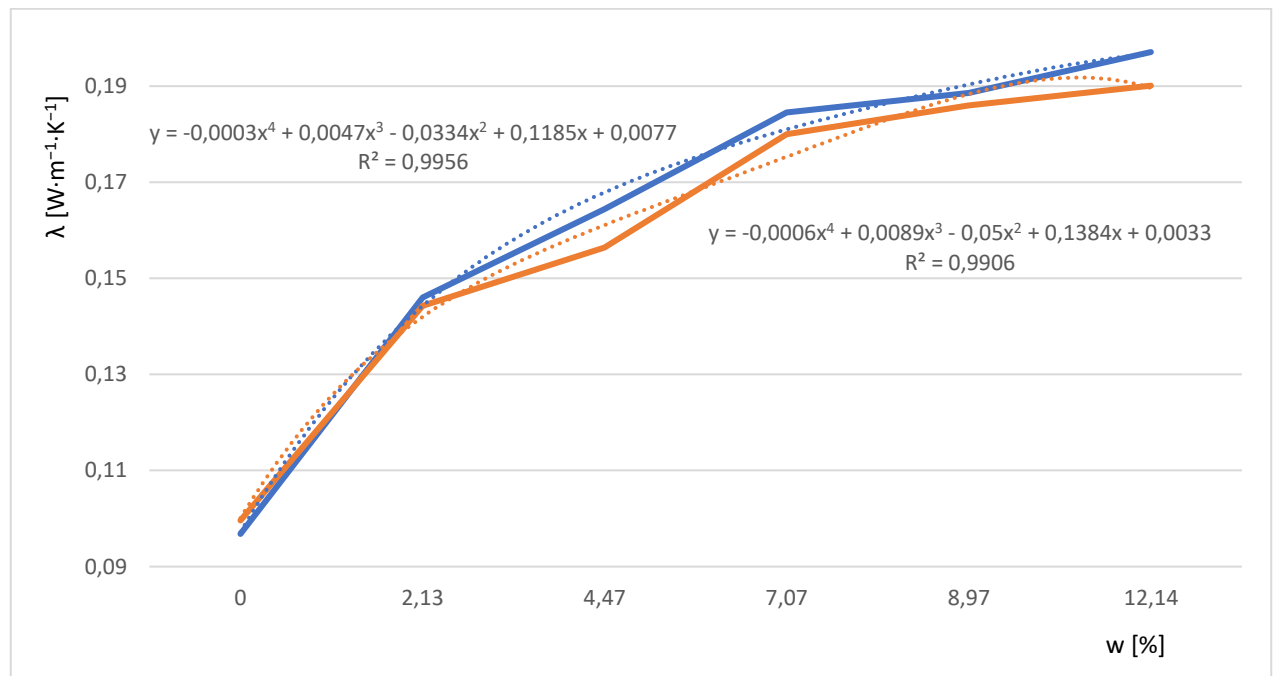
Obrázek 47: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu EPS 50F

## 2.5.5 Pórobeton

Pro porovnání naměřených výsledků a ověření metodiky měření byly stanoveny dále vlhkostní závislosti součinitele tepelné vodivosti pro pórobeton, a to vytvořeným experimentálním měřidlem a zároveň pomocí přístroje Shoterm.

Tabulka 27: Získané hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro danou vlhkost

vzorek	skutečná vlhkost [%]	$\lambda_{\text{shoterm}}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\lambda_{\text{kateřina}}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Objemová hmotnost za sucha [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Diference [%]
1	0,00	0,0968	0,0996	330,51	2,81
2	2,13	0,1460	0,1443	330,63	1,16
3	4,47	0,1644	0,1564	330,64	4,86
4	7,07	0,1845	0,1800	339,44	2,43
5	8,97	0,1886	0,1860	327,92	1,37
6	12,14	0,1971	0, 1898	328,48	3,70



Obrázek 48: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu pórobetonu

Ze získaných dat byly ověřeny teoretické poznatky týkající se vlivu vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti pro všechny sady vzorků. Problematické bylo zajistit dostatečnou vlhkost pro vzorky polystyrénu z důvod jeho minimální absorpce vlhkosti, která se pohybuje do 1 %. Výsledky měření byly dále ověřeny na skupině vzorků z pórobetonu a zároveň se zde okamžitě vyhodnotila hodnota součinitele tepelné vodivosti přístrojem Shoterm. Rozdíl mezi hodnotou získanou přístrojem Shoterm a hodnotou získanou metodou bisekce byl do 5 %.

## 2.6 Závěr

Předložená diplomová práce je věnována problematice stanovení tepelných charakteristik, a to součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity a dále jsou zde ověřeny faktické poznatky, které se týkají právě součinitele tepelné vodivosti a jeho závislosti na vlhkostním stavu měřených vzorků.

První část práce je rešerše, která se přímo věnuje popisu mechanismů šíření tepla.

Druhá část práce pak velice podrobně řeší tepelnou vodivost vyjádřenou součinitelem tepelné vodivosti a jeho závislost na vlhkosti vzorku, teplotě vzorku, pórovitosti, jeho objemové hmotnosti a v případě vláknitých či anizotropních materiálů jejich závislost na směru tepelného toku kolmo na vlákna a ve směru vláken. Dále je zde popsána problematika návrhových, deklarovaných a naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti, jsou zde vybrány reprezentativní stavební hmoty a uvedeny jejich hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Dále se zde popisuje tepelná kapacita a její závislost na vlhkosti.

Třetí a poslední kapitola rešeršní části je věnována teorii stanovení součinitele tepelné vodivosti a zároveň se zde popisují moderní metody měření, zejména pak metoda horkého drátu a přístroj Isomet 2104.

Praktická část se věnuje právě invenci metody horkého drátu a přináší do tohoto tématu nové poznatky. Namísto nekonečně tenkého a nekonečně dlouhého drátu byla využita topná plocha ve tvaru kruhové výseče a měříme teploty na rozhraní sonda-vzorek. Pro zpracování naměřených hodnot byl dále využit software ANSYS a matematická metoda bisekce (půlení intervalů).

Z důvodu náročnosti této práce bylo vyvinuto měřící ústrojí s pracovním názvem Kateřina, které si klade za cíl rychlé a co nejvíce přesné stanovení součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity, a to při zachování nízkých výrobních nákladů.

Měřící ústrojí Kateřina je již druhou verzí přístroje nestacionárního měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity za použití zdroje tepla, které má experimentální kruhový charakter.

Teoretický model šíření tepelné vlny systémem v softwaru ANSYS uvažuje dokonalý styk na rozhraní sonda-vzorek, přičemž při reálných podmínkách dochází v mezivrstvě k proudění vzduchu. Dále software ANSYS uvažuje zdroj tepla jako nekonečně tenkou plochu, která má ve všech místech konstantní hodnotu tepelné energie. V praxi je však toto neproveditelné a tyto rozdíly nám znehodnocují konečné výsledky.

Naměřené výsledky se teoreticky zpřesní, pokud bychom našli rovnici plochy, ve kterých se nachází naše naměřené hodnoty. Problematika je ale mnohem složitější, než se na první pohled zdá, a to z důvodu potřebného množství bodů. K tomu, abychom výsledky skutečně zpřesnily a zjistili rovnici paraboly, na které se body nachází, by bylo zapotřebí celkem 100 bodů ve 3D prostoru (tj. 300 hodnot). Takové měření by zabralo až příliš mnoho času s nejistým výsledkem. Jelikož si tato práce klade za cíl rychlé a levné stanovení součinitele tepelné vodivosti, tak tuto možnost zamítáme.

První třetina praktické části popisuje problematiku sestavení měřícího ústrojí pomocí jednodeskového počítače Raspberry Pi III, zvolených teplotních čidel Pt1000 a dalších součástí.

Druhá třetina se věnuje ověření funkčnosti měřidla a způsobu vyhodnocení naměřených hodnot na vzorcích desek z technického konopí a desek z lehčeného polystyrénu. Byly zde úspěšně stanoveny hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity pro oba vzorky a byly porovnány výsledky pomocí přístroje Shoterm a pomocí přístroje Isomet 2104. Tímto porovnáním byla prokázána shoda výsledků (rozdíl pod 5 %) a tedy reprodukovatelnost výsledků se ukázala jako příznivá. Dále bylo provedeno několik dalších měření pro stanovení vlhkostních charakteristik stavebních materiálů jako další ověření funkčnosti našeho měřícího ústrojí a jako ověření dosavadních teoretických poznatků týkajících se součinitele tepelné vodivosti. Tyto poznatky byly úspěšně ověřeny.

V další fázi jsme se měli věnovat odvození rovnice, pro vyhodnocení naměřených hodnot, metodou konečných objemů, avšak tato problematika se ukázala jako příliš obsáhlá pro rozsah diplomové práce.

V současné době měřící ústrojí s označením Kateřina mohu doporučit pouze jako měřidlo, pomocí kterého zjistíme šíření teplotní vlny pro následující vyhodnocení pomocí zvolené numerické metody. Metodu bisekce pomocí softwaru ANSYS nelze doporučit z důvodu zdlouhavého vyhodnocení naměřených výsledků, které se pohybuje v rámci 2 hodin.

## Seznam použité literatury

- [1] KOLOMAZNÍK, K., SEDLÁŘ, J., MACHÁČKOVÁ, A.: Teorie technologických procesů III. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1978, 1.vydání, skriptum VUT.
- [2] BRZOBOHATÝ, P.: Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, Zlín 2002, s. 15-18
- [3] KREMPASKÝ, Július. Meranie Termofyzikálnych veličín. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. ISBN 71-0,44-69.
- [4] Vedení tepla: Wikipedie. [Http://cs.wikipedia.org/](http://cs.wikipedia.org/) [online]. 2012 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD\\_tepla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_tepla)
- [5] BITTNER, J.: Měření tepelných vlastností materiálů. Bakalářská práce, fakulta technologická, UTB ve Zlíně, Zlín 2006
- [6] ZACH, HROUDOVÁ, Možnosti stanovení součinitele tepelné vodivosti u keramických zdicích tvarovek. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014, GRANT journal ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4
- [7] Tabulka hodnot součinitele tepelné vodivosti a objemové hmotnosti materiálů dostupná: <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>
- [8] ŘEHÁNEK, J. a kol.: Tepelně technické a energetické vlastnosti budov, Praha, Grada, 2002
- [9] HORÁK, Z.: Praktická fyzika. SNTL, Praha 1968
- [10] ONDRÁŠ, J.: Nestacionární metody měření tepelné vodivosti. Diplomová práce, fakulta technologická, VUT Brno, Gottwaldov 1983
- [11] Návrhová, deklarovaná a charakteristická hodnota součinitele tepelné vodivosti: <https://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/311-soucinitel-tepelne-vodivosti>
- [12] KUNO, Z.: Tepelné izolácie a meranie tepelných ztrát. SNTL. Praha 1963
- [13] Applied Precision Ltd. [on line]. [cit. 2006-04-25]. Dostupný z: <http://www.appliedp.sk/en/isomet.htm>
- [14] Thermophysical properties laboratory [on line]. [cit. 2006-04-21]. Dostupný z: [http://www.tpl.ukf.sk/engl\\_vers/hot\\_wire.htm](http://www.tpl.ukf.sk/engl_vers/hot_wire.htm)
- [15] MOŠNA, F.: Materiály a technologie III.- Nekovové materiály, SPN, 1988

- [16] ČSN EN ISO 8894-1 (726047) Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)
- [17] KREMPASKÝ, Július. *Meranie Termofyzikálnych veličín*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. ISBN 71-0,44-69.
- [18] Obvod MAX31865 dostupné z:  
<https://www.ebay.co.uk/itm/PT100-MAX31865-RTD-Temperature-Thermocouple-Sensor-Amplifier-Module-For-Arduino-/292099648071>
- [18] Zapojení obvodu MAX31865 dostupné z:  
<http://hallard.me/max31865/>
- [19] Izolační deska PURA dostupné z:  
<http://www.meffert.cz/desky-pura>
- [20] Izolační deska CLIMA PLUS dostupné z:  
<http://www.meffert.cz/produkty-redstone-clima-plus-izolacni-a-sanacni-deska>
- [21] Epondovaný polystyrén dostupné z:  
<https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [22] Konopná izolace dostupné z:  
<http://www.konopna-izolace.cz/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma stacionárního vedení tepla jednoduchou, homogenní, izotropní deskou .....	4
Obrázek 2: Graf vlivu teploty na hustotu látky .....	7
Obrázek 3: Součinitel tepelné vodivosti škvárobetonu v závislosti na objemové hmotnosti .....	12
Obrázek 4: Součinitel tepelné vodivosti minerální vlny v závislosti na objemové hmotnosti .....	12
Obrázek 5: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové vlhkosti a teplotě materiálu. ....	16
Obrázek 7: Schéma uspořádání přístroje na měření součinitele tepelné vodivosti metodou chráněné topné desky .....	26
Obrázek 8: Schéma uspořádání přístroje na měření součinitele tepelné vodivosti sypkých materiálů ..	26
Obrázek 9: Rozměrové schéma válcové měřicí metody .....	27
Obrázek 10: Rozměrové schéma válcové měřicí metody .....	29
Obrázek 11: Uspořádání měřicího zařízení .....	33
Obrázek 12: Princip stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu .....	33
Obrázek 13: Princip stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu .....	34
Obrázek 14: Schéma počítače Raspberry .....	38
Obrázek 15: Využitý počítač Raspberry Pi3 .....	39
Obrázek 16: Využitý počítač Raspberry Pi3 .....	39
Obrázek 17: Schéma pinových konektorů Raspberry Pi 3 .....	39
Obrázek 18: Pohled na řídicí a měřicí program v Raspberry pi 3 .....	40
Obrázek 19: Tolerance Pt1000 standardních měřicích odporů .....	42
Obrázek 20: Vzhled teplotního čidla typu Pt1000 .....	42
Obrázek 21: Schéma zapojení teplotních čidel Pt1000 a obvodů MAX31865 .....	43
Obrázek 22: Obvod MAX31865 .....	44
Obrázek 23: Připojení MAX31865 k Raspberry Pi3 .....	44
Obrázek 24: Reálné zapojení měřicího ústrojí .....	43
Obrázek 25: Schéma měřicí sondy v softwaru ANSYS .....	45
Obrázek 26: Prvotní návrh konstrukce měřidla s Raspberry Pi 2 .....	45
Obrázek 27: Schéma topného zdroje a měřicího čidla v softwaru ANSYS .....	46
Obrázek 28: Nejnovější verze měřicí sondy .....	46
Obrázek 29: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 1 s .....	47
Obrázek 28: Nejnovější verze měřicí sondy .....	47
Obrázek 30: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 120 s.....	47
Obrázek 31: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 240 s.....	48
Obrázek 32: Průběh teplot v softwaru ANSYS po čase 360 s.....	48
Obrázek 33: Deska PURA .....	52



Obrázek 34: mikrostruktura desky PURA .....	52
Obrázek 35: Deska z polystyrénu .....	54
Obrázek 36: Deska CLIMA PLUS a její aplikace .....	56
Obrázek 37: Deska z konopné izolace .....	57
Obrázek 38: Průběh šíření teoretické a reálné teplotní vlny vzorkem technického konopí .....	59
Obrázek 39: Závislost difference na součiniteli tepelné vodivosti .....	60
Obrázek 40: Průběh šíření teoretické a reálné teplotní vlny vzorkem pěnového polystyrénu .....	61
Obrázek 41: Závislost difference na součiniteli tepelné vodivosti .....	61
Obrázek 42: Sloupcový graf porovnání stanovených hodnot součinitele tepelné vodivosti metodou zpětného modelování, přístrojem Shoterm a přístrojem Isomet 2104.....	63
Obrázek 44: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu desky PURA .....	66
Obrázek 45: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu CLIMA PLUS.....	69
Obrázek 46: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu EPS 100S .....	70
Obrázek 47: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu EPS 50F .....	72
Obrázek 48: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkostním stavu pórobetonu...	72