



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Sklenář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Milan Sklenář

ID: 164398

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Měření tepelné vodivosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření nestacionární metody měření tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte rešerši týkající se měření tepelné vodivosti materiálů nestacionární metodou.
2. Ověřte nestacionární metodu měření tepelné vodivosti s bodovým zdrojem, navrhnete a ověřte způsoby technické realizace, naměřené průběhy porovnejte s teoretickými předpoklady.
3. Navrhnete a realizujte přípravek vhodný pro použití v laboratorních podmínkách, diskutujte volbu parametrů přípravku.
4. Stanovte nejistoty měření u nestacionární metody s bodovým zdrojem, diskutujte hlavní zdroje nejistoty měření a možnosti potlačení jejich vlivu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Krempaský, J.: Meranie termofyzikálných veličín. 1. vyd. Bratislava, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 23.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce popisuje měření tepelné vodivosti izolačních materiálů nestacionární metodou využívající bodový zdroj tepla a šířením tepla materiálu. Je popsán použitý měřicí přípravek, postup měření a přístroje použité při měření. Práce se zabývá ověřením teoretických vztahů a působením vlivů, které mohou ovlivnit přesnost naměřených hodnot.

Klíčová slova

Teplená vodivost, šíření tepla, bodový zdroj tepla, nestacionární měření, Fourierův zákon, snímač tepelné vodivosti.

Abstract

This thesis focus on measurement of thermal conductivity by transient point heat source method and heat diffusion through material. There is described exemplar, measurement procedure and used devices. Thesis focus on verification of teoretical equations and effects of variables, which can affect accuracy of measurement.

Key words

Thermal conductivity, heat diffusion, point heat source, transient measurement, Fouriers law, thermal conductivity sensor.

Bibliografická citace:

SKLENÁŘ, M. *Měření tepelné vodivosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření tepelné vodivosti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing Petru Benešovi, Ph.D. za odbornou a pedagogickou pomoc, ochotu, čas strávená konzultacemi a cenné rady při zpracovávání mé semestrální práce.

V Brně

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretická část	9
2.1	Teplo a tepelná vodivost	9
2.2	Nestacionární metoda měření tepelné vodivosti.....	10
2.3	Vliv parazitních vlivů na tepelnou vodivost.....	12
2.3.1	Vliv pórovitosti na tepelnou vodivost.....	12
2.3.2	Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost.....	12
2.3.3	Vliv teploty na tepelnou vodivost.....	13
2.4	Senzory tepelných veličin	14
2.4.1	Odporové kovové senzory teploty	14
2.4.2	Polovodičové odporové senzory teploty	15
2.4.3	Termistory	16
2.4.4	Dilatační teploměry	17
2.4.5	Bezdotykové měření tepla.....	18
2.4.6	Termoelektrické senzory teploty.....	19
3	Praktická část.....	20
3.1	Proměření termistoru v kalibrační píce	20
3.2	Popis měřícího přípravku pro měření tepelné vodivosti	23
3.3	Postup měření tepelné vodivosti:	25
3.4	Měření na pórobetonu Ytong.....	26
3.5	Měření na vzorku polystyrenu.....	29
3.5.1	Vliv délky pulzu a volba vhodné časové korekce:.....	29
3.5.2	Vliv vzdálenosti od zdroje tepla.....	33
3.5.3	Zjištění vlivu kvality přenosu tepla ze zdroje do polystyrenu a z polystyrenu do termistoru.....	36
3.5.4	Vliv uspořádání vodičů	39
3.6	Experiment šíření tepla	42
3.6.1	Popis přípravku a postup měření	42
3.6.2	Experiment šíření tepla – vliv vzdálenosti na dobu teplotního maxima	44
3.6.3	Experiment šíření tepla – vliv uspořádání přívodních vodičů na měření	47
4	Závěr	50
5	Literatura	51
6	Seznam symbolů, obrázků a grafů.....	52

6.1	Seznam symbolů.....	52
6.2	Seznam tabulek	53
6.3	Seznam obrázků	53
6.4	Seznam grafů.....	54
6.5	Seznam příloh na CD.....	54

1 Úvod

Tato práce se zaměřuje na nestacionární metodu měření tepelné vodivosti s využitím bodového zdroje tepla umístěného i se snímačem uvnitř měřeného vzorku. Parametr tepelná vodivost má ve stavebnictví velký význam, protože určuje, jak dobře stavební materiál vede teplo, respektive tepelně izoluje.

Cílem mé práce je ověření teoretických principů experimentálně, a následné zjištění parazitních vlivů ovlivňující přesnost měření, navrhnout řešení na minimalizaci jejich vlivu.

Navázáním na výsledky mé bakalářské práce může být vytvoření laboratorní úlohy pro měření tepelné vodivosti nebo přenosného měřicího přístroje použitelného v praxi. Vhodného na měření měkkých materiálů jako minerální vata nebo polystyren pomocí zapichovací sondy.

Dříve byl jako bakalářská práce prováděn podobný experiment se zdrojem tepla a snímačem na povrchu. Na výsledky předchozí práce jsem navázal a využil poznatků z předešlé bakalářské práce, abych v mé bakalářské práci předešel chybám, které se vyskytly už dříve.

2 Teoretická část

2.1 Teplo a tepelná vodivost

Nemá-li těleso ve všech svých částech stejnou teplotu, dojde k vyrovnání teplot v tělese vedením tepla. Přenos tepla vedením je způsob, kterým dochází k transferu energie v materiálu srážkami sousedních atomů v krystalové mřížce. Rychlost přenosu tepla závisí na rozdílu teplot, materiálu a ploše, kterou k přenosu tepla dochází. Je jediným způsobem přenosu tepla uvnitř pevného materiálu. Vedení tepla se dá rozdělit na ustálené, kdy je přenos tepla v čase konstantní, a neustálené vedení tepla vyznačující se proměnným přenosem tepla. Rychlost šíření tepla v materiálech určuje tepelná vodivost λ s rozměrem $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, která je definována Fourierovým zákonem: [1][4]

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

T – teplota (K), \mathbf{q} – vektor hustoty tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]. Znamená množství tepla, které prochází kolmo na směr proudění jednotkovým průřezem materiálu v ustáleném stavu za jednotku času při jednotkovém gradientu teploty. Rovnice pro vedení tepla je matematickým základem pro měření termoelektrických a tepelných veličin.[1]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \text{grad}T] + q_0 \quad (2)$$

t – čas [s], q_0 = výkon s jakým je teplo generováno[W]. Tato rovnice pro izotropní látku lze přepsat do tvaru:[4]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c\rho} q_0 \quad (3)$$

Tepelná vodivost se poté dá také definovat pomocí teplotní vodivosti k [m^2/s], měrné tepelné kapacity c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a hustoty látky ρ [kg/m^3]

$$\lambda = \rho * c * k \quad (4)$$

Velikost tepelné vodivosti stavebních materiálů při teplotě 20°C se pohybuje v rozsahu od $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (například beton $\lambda = 0,4 - 0,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) až po setiny $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (například polystyren $\lambda = 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). [4]

2.2 Nestacionární metoda měření tepelné vodivosti

Nestacionární metody měření se dají rozdělit do dvou základních skupin. Zaprvé bezzdrojové metody které mají v diferenciální rovnici $q_0=0$ (2). Teplota vzorku se ovlivňuje vnějším prostředím nebo nekonečně velkým zásobníkem tepla. Zadruhé zdrojové metody, které mají $q_0 \neq 0$, kdy na měřený vzorek působí definovaný zdroj tepla s nenulovým výkonem. Tyto metody lze rozdělit na stacionární (ustálené), s konstantním přenosem tepla, nebo nestacionární (neustálené) kdy se množství přeneseného tepla mění s časem. [1]

Zdrojové metody je možno dělit podle tvaru použitého zdroje (bodové, lineární a plošné), nebo podle časového průběhu zdroje tepla (konstantní, impulzní, periodické.), anebo podle tvaru měřeného vzorku (nekonečný prostor, poloprostor, deska definovaných rozměrů...). Pro každou situaci platí trochu jiné vzorce. V této práci se používá nestacionární metoda s pulzním bodovým zdrojem působícím definovanou dobu v nekonečném prostoru.[1]

Základní rovnicí nestacionárního šíření tepla nekonečně velkým materiálem při použití ideálního zdroje tepla:[10], [11]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

θ – je nárůst teploty, k – teplotní vodivost. Veškerá tepelná energie je uvolněna v čase $t=0$ s.

Pokud vzdálenost od zdroje tepla vyjádříme jako $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ lze upravit výchozí rovnici do tvaru kdy získáme funkce vyjadřující velikost teploty v libovolné vzdálenosti a čase:[1], [10], [11]

$$T(r, t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi^{3/2} * c * \rho * \sqrt{k * t^3}} \exp\left[-\frac{r^2}{4kt}\right] \quad (6)$$

. Q – celkové teplo dodané zdrojem, r – vzdálenost od zdroje tepla, k – teplotní vodivost, λ – tepelná vodivost, t – čas od dodání tepla. Předpokládá se ideální zdroj tepla, který dodá v nekonečně krátkém čase teplo o velikosti Q .

Rovnice č. 6 se dále dá upravit odstraněním exponenciální funkce: [10],

$$T(r, t) = \frac{q_{bod}}{2\pi kr} * \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{2\sqrt{at}}\right) \quad (7)$$

q_{bod} – výkon dodávaný bodovým zdrojem tepla. erfc – complementary error function což je doplněk do Gaussovy chybové funkce.

Pro ustálené šíření tepla, $t = \infty$, se rovnice č. 7 zjednoduší na tvar: [10]

$$T(r, t) = \frac{q_{bod}}{2\pi kr} \quad (8)$$

U pohybujícího se zdroje je průběh teploty v materiálu dle vztahu:[10]

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q_{bod} \exp\left[-\frac{Ux}{2k}\right]}{4(k\pi t)^{3/2} c \rho} \int_0^t \frac{\exp\left[-\frac{r^2}{4k\tau} - \frac{U^2 \tau}{4k\tau}\right]}{\tau^{3/2}} \quad (10)$$

X je vzdálenost kterou ve směru osy x překoná zdroj tepla v čase t, τ – doba po kterou se zdroj tepla pohybuje, U – rychlost pohybu zdroje, ρ – hustota materiálu, c- tepelná kapacita

Teplotní funkce z rovnice č. dosáhne maxima v čase: [1], [10],

$$t_m = \frac{r^2}{6k} \quad (11)$$

Pak vztah pro tepelnou vodivost má tvar:

$$\lambda = \frac{\rho cr^2}{6t_m} \quad (12)$$

Přenos bodovým zdrojem tepla v impulzním režimu je v ideálním případě realizovaný co nejmenší plochou během co nejkratšího časového okamžiku. V praxi není možné dodat dostatečné množství v nekonečně krátkém čase, proto zdroje tepla musí pracovat po dobu Δt .

Pro použití vztahu bez korekce musí platit $t_m > 50\Delta t$, ideálně nekonečně krátký pulz. Tuto podmínku je problematické splnit, protože předané teplo by bylo příliš malé, a proto obtížně detekovatelné teplotní maximum a narůstala by chyba měření. Pro pulzy konečné délky Δt je nutné vztah upravit a použít korekci. Vztah pro tepelnou vodivost s korekcí [2]

$$\lambda = \frac{\rho cr^2}{6\Delta t} * \left[\frac{\Delta t}{t_m} + 0.4 \left(\frac{\Delta t}{t_m} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\Delta t}{t_m} \right)^3 + 1.1 \left(\frac{\Delta t}{t_m} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Případně lze použít časová korekce z jiné literatury: [1]

$$\lambda = \frac{\rho cr^2}{6\Delta t} \left[\frac{\Delta t}{t_m} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{t_m} \right)^2 + \frac{5}{12} \left(\frac{\Delta t}{t_m} \right)^3 + \dots \right]. \quad (14)$$

Pozn.: Pro tento korekční vztah se nepovedlo dohledat další členy řady.

Princip metody spočívá v měření časového intervalu, než dojde k dosažení teplotního maxima v měřeném bodě. Nezávisí na amplitudě tepelné vlny. Metoda má být nezávislá na množství zdrojem dodaného tepla do vzorku. Proto není třeba přesně měřit zdrojem dodávaný výkon. [1]

2.3 Vliv parazitních vlivů na tepelnou vodivost

Velikost tepelné vodivosti určuje více vlivů – teplota, tlak, vlhkost, struktura látky, měrná hmotnost, elektrické a magnetické pole.[1]

2.3.1 Vliv pórovitosti na tepelnou vodivost

Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost je značný. Obzvláště přítomnost pórů a dutin v materiálu výrazně snižuje tepelnou vodivost. Pórovitost je definována jako poměr objemu kapilár pórů dutin k celkovému objemu látky. Poréznost různých tepelně izolačních materiálů se vzájemně velmi liší, od poréznosti $p = 0,002$ až po $p = 0,99$ (např. pěnový polystyren). Čím větší objemová hmotnost izolace tím je větší tepelná vodivost materiálu. Velmi také závisí na velikosti dutin v materiálu, menší velikost pórů při stejné objemové hmotnosti zajistí lepší tepelně izolační vlastnosti.[8]

2.3.2 Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost

Vlhkost snižuje tepelně izolační vlastnosti látek, protože s rostoucí vlhkostí dochází ke zvyšování tepelné vodivosti. Vzduch je vytlačován vodou z dutin a pórů, které mají zásadní vliv na tepelně izolační vlastnosti. Voda má přibližně 24 krát vyšší tepelnou vodivost a při teplotách pod bodem mrazu se tepelná vodivost zmrzlé vody ještě zvyšuje až na stonásobek tepelné vodivosti vzduchu. [8]

U anorganických materiálů platí vztah pro poměrné zvýšení tepelné vodivosti dle vztahu: [8]

$$\frac{\lambda}{\lambda_s} = (1 + k_0 u_0) \quad (15)$$

λ_s – tepelná vodivost suchého materiálu, u_0 - objemová vlhkost je poměr vlhkosti v materiálu k objemu materiálu, k_0 – součinitel materiálu jehož hodnota se snižuje s rostoucí objemovou vlhkostí dle tabulky č. 1: [8]

100*u ₀	1	2,5	5	10	15	20	25
k ₀	32	22	15,1	10,8	8,5	7,2	6,2

V praxi můžeme vliv vlhkosti na tepelnou vodivost zjednodušit tak že u organických materiálů s každým zvýšením hmotnosti vody obsažené v tělese o 1% se zvýší tepelná vodivost o 1,25%. U anorganických materiálů je vliv vlhkosti na tepelnou vodivost popsán tabulkou č. 2:[9]

obsah vlhkosti v objemu [%]	1	2,5	5	10	15	20	25
přírůstek tepelné vodivosti oproti suchému stavu [%]	30	55	75	108	132	155	175

2.3.3 Vliv teploty na tepelnou vodivost

Narůstající teplota zhoršuje tepelně izolační vlastnosti stavebních materiálů a roste tepelná vodivost tuhé látky. U pórovitých materiálů se přidává vliv konvekce v dutinách materiálů. U pórovitých materiálů narůst tepelná vodivost s teplotou rychleji než u pevných materiálů. Za běžných podmínek je vliv teploty na tepelnou vodivost velmi malý. [8]

Výpočet změny tepelné vodivosti v závislosti na teplotě může mít buď kvadratický, nebo lineární průběh: [9]

$$\text{lineární závislost:} \quad \lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (16)$$

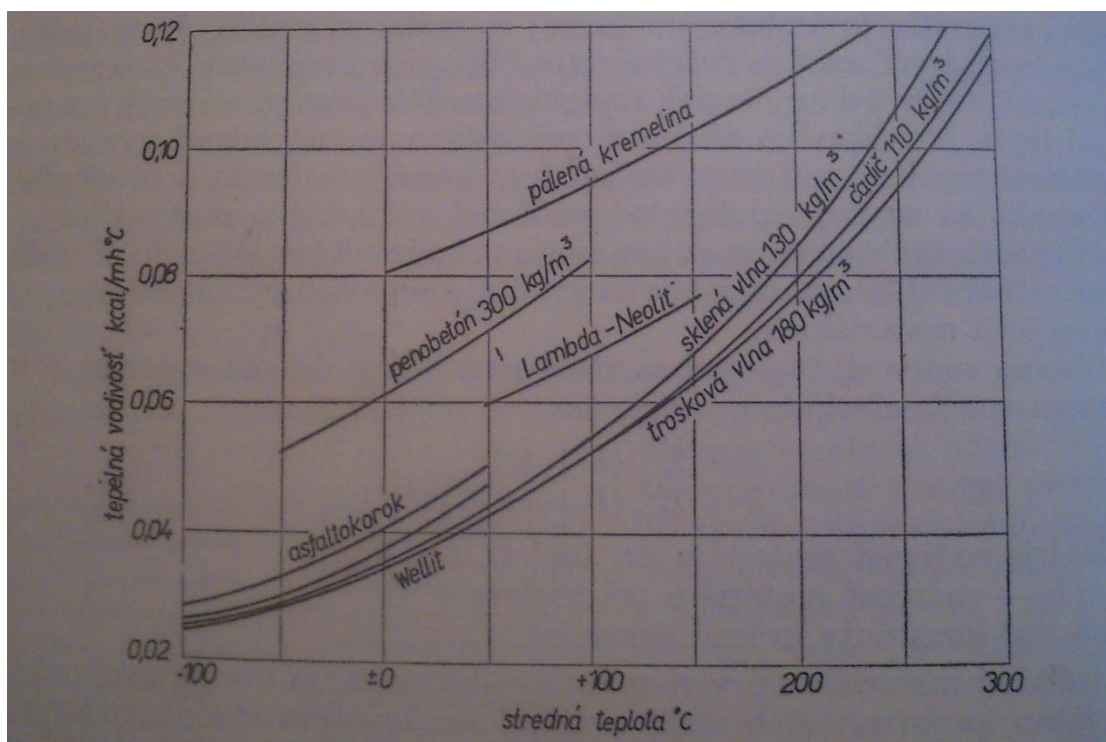
$$\text{kvadratická závislost:} \quad \lambda = \lambda_0(1 + bt + ct^2) \quad (17)$$

λ – tepelná vodivost při teplotě t , λ_0 – tepelná vodivost materiálu při 0°C

b, c – konstanty materiálu určené měřením.

Izolační materiály ve svém teplotním rozsahu použití můžeme považovat závislost tepelné vodivosti na teplotě za lineární.[9]

Obrázek č. 1: Charakteristika tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů v závislosti na teplotě [9]



2.4 Senzory tepelných veličin

2.4.1 Odporové kovové senzory teploty

Využívají teplotní závislosti odporu kovu na teplotě. Se zvětšující se teplotou odpor kovu narůstá.

Platinový odporový teploměr

V keramice nebo skle je zatavený odporový platinový drátek smotaný do spirály pro větší citlivost senzoru. Měřící odpory se dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A má rozsah teplot od -200°C do 650°C , třída B rozsah -200°C až 850°C . Odpor senzoru při 0°C bývá standardně 100Ω . Chyba při 0°C je v širší toleranční třídě do $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ a v užší toleranční třídě do $0,125^{\circ}\text{C}$. S narůstající teplotou tolerance narůstá. Teplotní roztažnost materiálu, na kterém je platinový drátek umístěn snižuje přesnost měřené hodnoty až o $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ pro teploty nad 400°C .

Výhodou platinového senzoru je dobrá chemická netečnost, vysoká teplota tání a časová stálost. [3]

Teplotní závislost odporu pro rozsah -200°C až 850°C : [3]

$$R_{\vartheta} = R_0 [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \quad (18)$$

dle IEC platí $W_{100} = 1,385$

$$R_0 = 100 \Omega$$

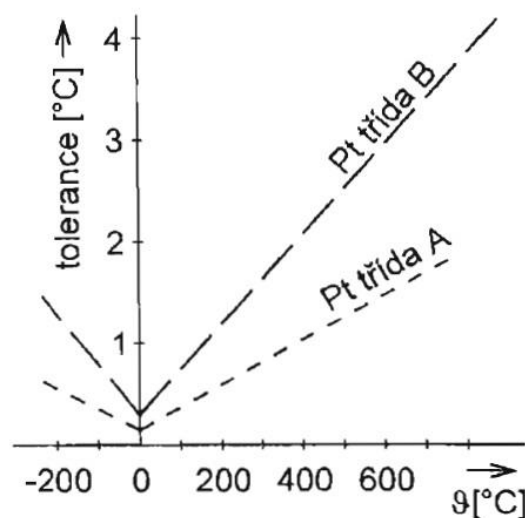
$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = -5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4} \quad \text{pro } \vartheta < 0^{\circ}\text{C}$$

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

obrázek č. 2: Tolerance platinového senzoru v závislosti na teplotě dle IEC. [3]



Niklový odporový teploměr

Se skládá z keramické podložky z jemnozrnného korundu, na které je tenkovrstvou technologií nanесena vrstva niklu. Výhodou niklových senzorů je vysoká citlivost, malé rozměry a rychlá odezva ale nevýhodou je malý teplotní rozsah v porovnání s platinou. Rozsah teplot od -60°C do 180°C . [3]

Teplotní závislost odporu: [3]

$$\frac{R_{\vartheta}}{R_0} = [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^2(\vartheta - 100)] \quad (19)$$

2.4.2 Polovodičové odporové senzory teploty

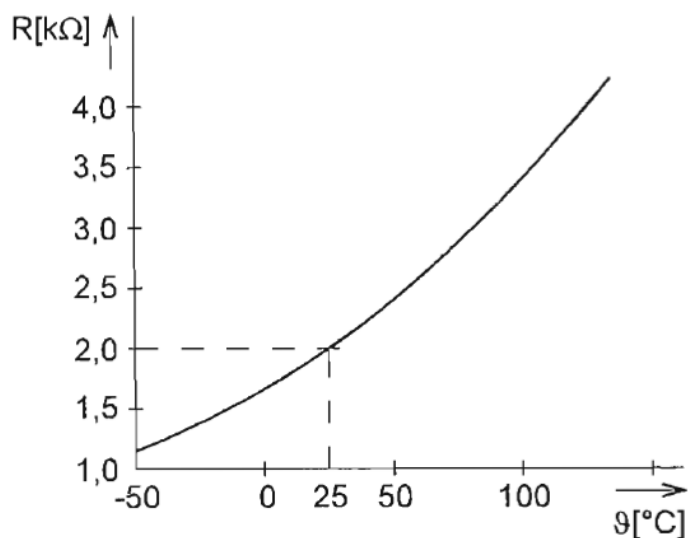
Využívají teplotní závislosti odporu polovodiče na teplotě. Se zvyšující se teplotou odpor polovodiče klesá.

Monokrystalický senzor teploty

Je vyráběný nejčastěji z křemíku z nevlastního polovodiče typu N s převládající elektronovou vodivostí. Se zvyšující se teplotou, obdobně jako u kovů dochází k nárůstu odporu. Dotační příměsí se upravuje velikost teplotního rozsahu, který je obvykle od -50°C do 150°C . Typickou hodnotou odporu pro 25°C je 2000Ω . Teplotní závislost monokrystalického senzoru: [3]

$$R = R_r + k(\vartheta - \vartheta_r)^2 \quad (19)$$

obrázek č. 3: Závislost odporu monokrystalického senzoru na teplotě pro rozsah teplot 50°C až 150°C . [3]



2.4.3 Termistory

Pozistory

Termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. S rostoucí teplotou odpor termistoru nejprve mírně klesá, až po dosažení Curieovy teploty u pozistoru s rostoucí teplotou narůstá odpor. Vyráběny jsou z polykrystalické feroelektrické keramiky. Chemickým složením se ovlivňuje teplotní rozsah termistoru.[3]

Negastory jsou termistory se záporným teplotním součinitelem. S rostoucí teplotou klesá odpor. Teplotní rozsahy jsou obvykle v rozmezí od -50°C do 150°C ale pro krajní případy se vyrábí termistory od velmi nízkých teplot $4,2\text{K}$ až po vysoké teploty do 1000°C . Vyráběné práškovou technologií se směsí kovů jako například $\text{MnO} + \text{CoO}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ a podobně.

Výhodou je v porovnání s platinovým snímačem o řád větší teplotní součinitel odporu (od $-3\%/K$ až po $-6\%/K$). V porovnání s platinovým snímačem jsou nevýhody termistorů značná nelinearita závislosti odporu na teplotě a také menší stabilita, u běžných termistorů je obvykle nejistota $\pm 1\text{K}$. [3]

Závislost odporu termistoru na teplotě:[3]

$$R = A * e^{\frac{B}{T}} \quad (20)$$

Případně se dá vztah upravit do tvaru:[3]

$$R_1 = R_r e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r}\right)} \quad (21)$$

R_1 – odpor termistoru při teplotě T_1 ,

R_r – odpor termistoru při teplotě T_r

β [K] – teplotní materiálová konstanta

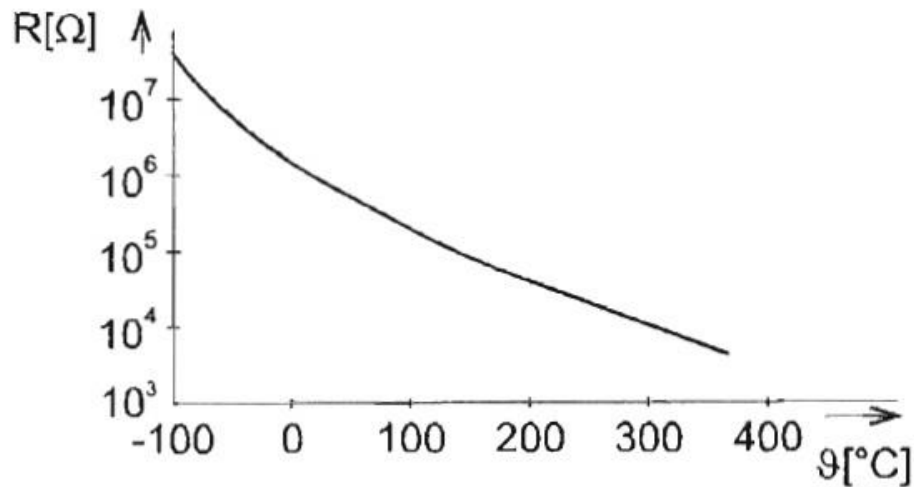
A [Ω] – konstanta závislá na tvaru a materiálu

T_r – referenční teplota se zpravidla volí $298,15\text{K} = 25^{\circ}\text{C}$

Úpravou vztahu č. 9 získáme vzorec pro výpočet teplotní materiálové konstanty β :[3]

$$\beta = \frac{T_1 * T_2}{T_2 - T_1} * \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (22)$$

obrázek č. 4: Závislost odporu termistoru na teplotě pro rozsah teplot od -100°C do 400°C [3]



2.4.4 Dilatační teploměry

Využívají změny objemu látky při změně teploty, čímž je měření teploty převedeno na měření objemu, tlaku nebo délky. [3]

Dvojkovové (bimetalové) senzory teploty využívají spojení dvojice kovů s různým součinitelem teplotní roztažnosti zkroucené do spirály nebo šroubovice pro dosažení lepší citlivosti. Použitelnost senzorů do 400°C [3]

Skleněné teploměry využívají objemové roztažnosti kapaliny jako je například rtuť, galistan nebo pentan. Hodnota teploty se určuje z výšky hladiny ve skleněné trubičce. Měřicí rozsah je daný použitou teploměrnou kapalinou (rtuť -30°C až 650°C , pentan -200°C až $+20^{\circ}\text{C}$). [3]

Tlakové senzory se skládají z deformačního tlakoměru a kovové nádoby, ve které je teploměrná kapalina. Kapalina s měnící se teplotou mění svůj objem a působí na tlakoměr. Kapalinou může být rtuť, metylalkohol aj. [3]

2.4.5 Bezdotykové měření tepla

Je měření povrchové teploty těles využívající měření elektromagnetického záření emitovaného tělesem, které odpovídá jeho teplotě. Záření má vlnovou délku od 0,4 μ m do 25 μ m pro rozsah teploty od -40°C do +10 000°C.

Klady bezdotykového měření jsou zanedbatelný vliv na měřený objekt, lze snímat celý povrch tělesa (termovize), možnost měření rychlých změn teploty a možnost měření rotujících nebo pochybujících se těles.

Nevýhodou bezdotykového měření je chyba způsobená odraženým zářením z okolí, dále obtížnost určit přesnou emisivitu měřeného tělesa a vliv prostupnosti prostředí.

Úhrnné radiační pyrometry pracují v celém spektru vlnových délek. Teplotu vyhodnocují dle Stefan-Bolzmannova zákona. Záření se zaostruje soustavou čoček na čidlo. Jako čidlo se používají tepelné senzory. Které absorpcí fotonů oteplují aktivní část senzoru a následně je oteplení měřeno přes senzory teploty (například termočlánky).[3]

Jednopásmové pyrometry měří teplotu v úzké oblasti vlnových délek od 10nm do jednotek μ m.[3]

Dvoupásmové poměrové pyrometry vyhodnocují teplotu na základě poměru intenzity záření dvou vlnových délek. Tento druh přístrojů je nezávislý na emisivitě měřeného předmětu. [3]

Bolometry využívají ohřevu senzoru dopadajícím zářením, tento ohřev je následně měřen pomocí senzorů na měření teploty. V termokamerách se využívá matice těchto prvků. [3]

2.4.6 Termoelektrické senzory teploty

Využívají principu Seebeckova jevu, při kterém se převádí tepelná energie na elektrickou. Dva různé vodiče nebo polovodiče jsou na koncích spojeny. Pokud mají spoje A, B rozdílnou teplotu pak mezi nimi začne protékat elektrický proud způsobený tím, že nositelé elektrického náboje mají v teplé části větší energii než ve studené. Pokud tento elektrický obvod kdekoliv rozpojíme, můžeme na něm měřit napětí úměrné rozdílu teplot mezi body A, B a kombinaci použitých materiálů.

Výpočet Seebeckových koeficientů: [3]

$$S_A = \int_0^T \frac{\sigma_A}{T} dT \quad ; \quad S_B = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T} dT \quad (23)$$

σ_A, σ_B – Thompsonovy koeficienty

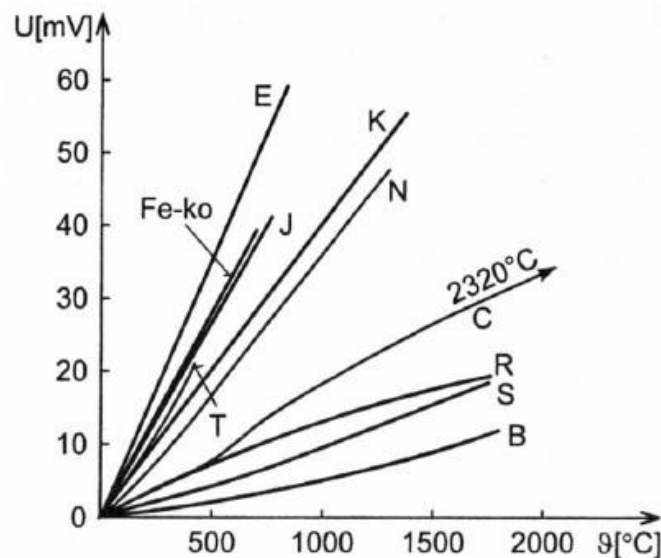
Z určených seebeckových koeficientů se vypočítá velikost napětí: [3]

$$U_{AB} = \int_0^T S_A - S_B dT \quad (24)$$

Pro zajištění přesného měření je třeba udržovat stejnou známou teplotu. Dalším nežádoucím parametrem ovlivňujícím přesnost je vliv přivodních vodičů.

Výhodou termočlánku je větší rozsah měřených teplot a větší mechanická odolnost než u platinových snímačů. Nevýhodami termočlánku v porovnání s platinovým snímačem je nižší přesnost, větší nelinearita a nutnost kompenzace teploty srovnávacího konce.[3]

obrázek č. 5: Charakteristiky různých druhů termočlánků [3]



E: NiCr - CuNi	N: NiCrSi - NiSi
Fe - ko	C: WRe5 - Wre26
J: Fe - CuNi	R: PtRh13 - Pt
T: Cu - CuNi	S: PtRh10 - Pt
K: NiCr - NiAl	B: PtRh30 - PtRh6

3 Praktická část

3.1 Proměření termistoru v kalibrační píce.

Byla proměřena charakteristika termistorů pro rozsah teplot 15 až 30°C. Tímto proměřením získáme přesnější převodní rovnici pro jednotlivé termistory.

NTC termistor Vishay NTCLE305E4SB, výrobcem udávané parametry:[5]

$$R_{25} = 2060\Omega$$

Tolerance termistoru -0,5% až +0,5%

rozsah provozních teplot: -40°C až +125°C

$$\beta = 3511K$$

Postup změření charakteristiky termistoru:

- 1) Před začátkem samotného měření je třeba prodloužit přívodní vodiče termistoru, aby mohl být zasunut dostatečně hluboko do kalibrační pícky. Pokud není termistor dostatečně zasunut, není vystaven nastavované teplotě.
- 2) Zasunout termistor do pícky a připojit kabelem k multimetru Agilent 33410A. Multimetr připojit USB kabelem do PC, kde se zaznamenávají naměřená data. Multimetr se nastaví pro dvou vodičové měření odporu.
- 3) Na kalibrační píce se nastaví počáteční teplota 15 °C a spustí se měření hodnot. Pro ustálení teploty se čeká 3 minuty, poté se zvýší teplota o 1°C a znovu se čeká na ustálení teploty. Teplota se zvyšuje do 30°C.

Tím to postupem byly proměřeny dva termistory. Po převodní rovnice termistoru byla určena proložení naměřených dat exponenciální křivkou v programu Excel. Rovnice pro první termistor

$$R_1 = 5494,7 * e^{-0,039t} \quad (25)$$

a pro druhý termistor

$$R_2 = 5459,9 * e^{-0,039t} \quad (26)$$

Zjištěné převodní rovnice jsou dále používány pro výpočet teploty ve vzorku.

Teplotní materiálová konstanta β je vypočtený vzorcem č 10. pro teplotu 25°C Jmenovité hodnoty parametrů pro první termistor je $R_{25} = 2066\Omega$, $\beta = 3411$ a pro druhý termistor $R_{25} = 2063\Omega$, $\beta = 3390$.

tabulka č. 3: Hodnoty odporů termistorů pro vybrané teploty a relativní chyby vůči hodnotě udávané výrobcem.

t [°C]	R [Ω]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	$\delta R1$ [%]	$\delta R2$ [%]
15	3064,4	3071,0	3056,8	0,21	-0,25
20	2504,6	2511,6	2506,3	0,28	0,07
25	2060,0	2065,7	2063,0	0,28	0,14
30	1704,4	1709,7	1707,9	0,31	0,21

Z tabulky č. 3 vidíme, že hodnoty odporů termistorů jsou ve výrobcem udávané toleranci $\pm 0,5\%$.

R – hodnota odporu udávaná výrobcem pro danou teplotu

R_1 -hodnota odporu prvního termistoru,

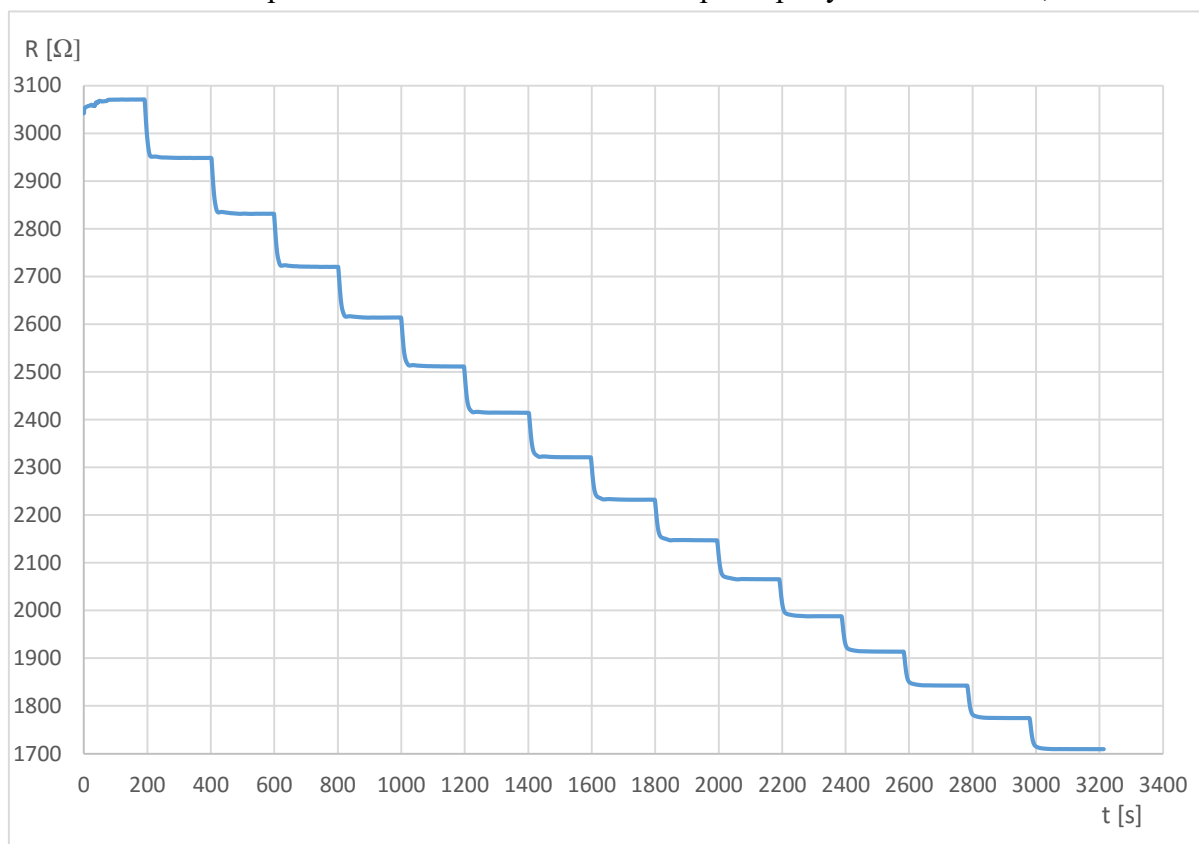
R_2 - hodnota odporu druhého termistoru

δR_1 – relativní chyba odporu prvního termistoru,

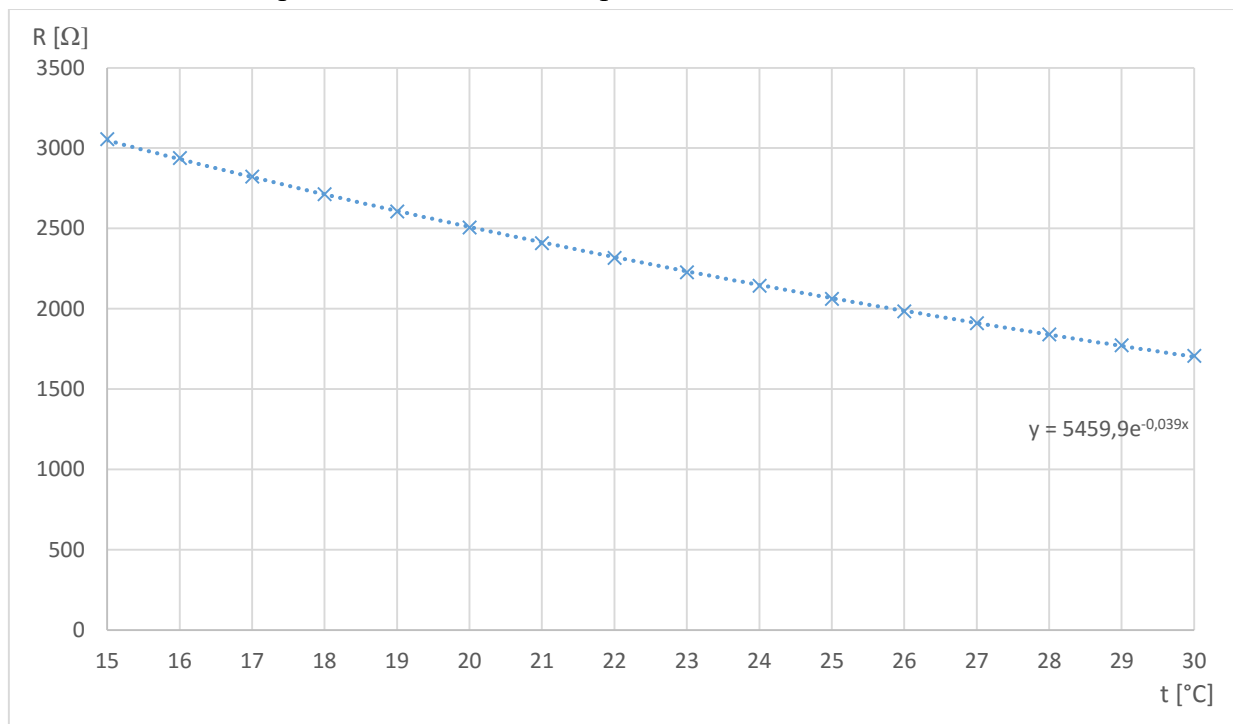
δR_2 – relativní chyba odporu druhého termistoru

Na grafu č. 1 je ilustračně zobrazen průběh velikosti odporu pro jednotlivé teploty od 15°C do 30°C. Z průběhu je zřejmé, že třiminutový interval mezi změnami teplot je dostatečný pro ustálení teploty termistoru. Z grafu č. 2 vidíme charakteristiku termistoru č. 1 pro narůstající teplotu. Charakteristika termistoru č. 2 je téměř stejná.

Graf č. 1 Průběh odporu termistoru během kalibrace pro teploty 15°C až 30°C , krokem 1°C



Graf č2. Závislost odporu termistoru č. 1 na teplotě



3.2 Popis měřicího přípravku pro měření tepelné vodivosti

Měření bylo prováděno na dvou stejných kusech polystyrenu EPS 100S o rozměrech 30x15x8 cm. Mezi tyto dva kusy polystyrenu byl vložen zdroj tepla a NTC termistor pro měření teploty. Pro první měření byla mezi dvěma kusy polystyrenu malá vzduchová mezera, kvůli hůře doléhajícímu polystyrénu, způsobená přívodními vodiči k zdroji tepla a termistoru. V dalších měřeních byla tato mezera minimalizována zatlačením přívodních vodičů do polystyrenu.

V různých vzdálenostech a pro různé uspořádání vodičů byl lepicí páskou přichycen zdroj tepla a termistor. Lepicí páska byla na přívodních vodičích, ne přímo na zdroji tepla nebo NTC termistoru, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Lepicí páska byla použita, aby bylo možné snadno měnit vzdálenost mezi zdrojem tepla a termistorem, případně uspořádání vodičů. Jako zdroj tepla je použitý SMD odpor YAGEO RC2512, $R = 10\Omega$ se ztrátovým výkonem 1W. SMD odpor byl zvolen pro malé rozměry, dostatečný ztrátový výkon a snadnost nastavení požadovaného výkonu. Termistor byl použit od výrobce Vishay model NTCLE305E4SB. Pro první měření nebyla mezi termistor, zdroj tepla a měřený vzorek nanášena teplovodivá pasta. Při dalších měřeních bylo nanášeno malé množství teplovodivé pasty značky HTC 35SL mezi zdroj tepla, termistor a měřený vzorek.

Výrobce polystyrenu EPS 100S udávané parametry:[5]

$$\rho = 18 - 23 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$c = 1270 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

Seznam přístrojů a přípravků

Multimetr Agilent 33410A

Zdroj TTI CPX400SP

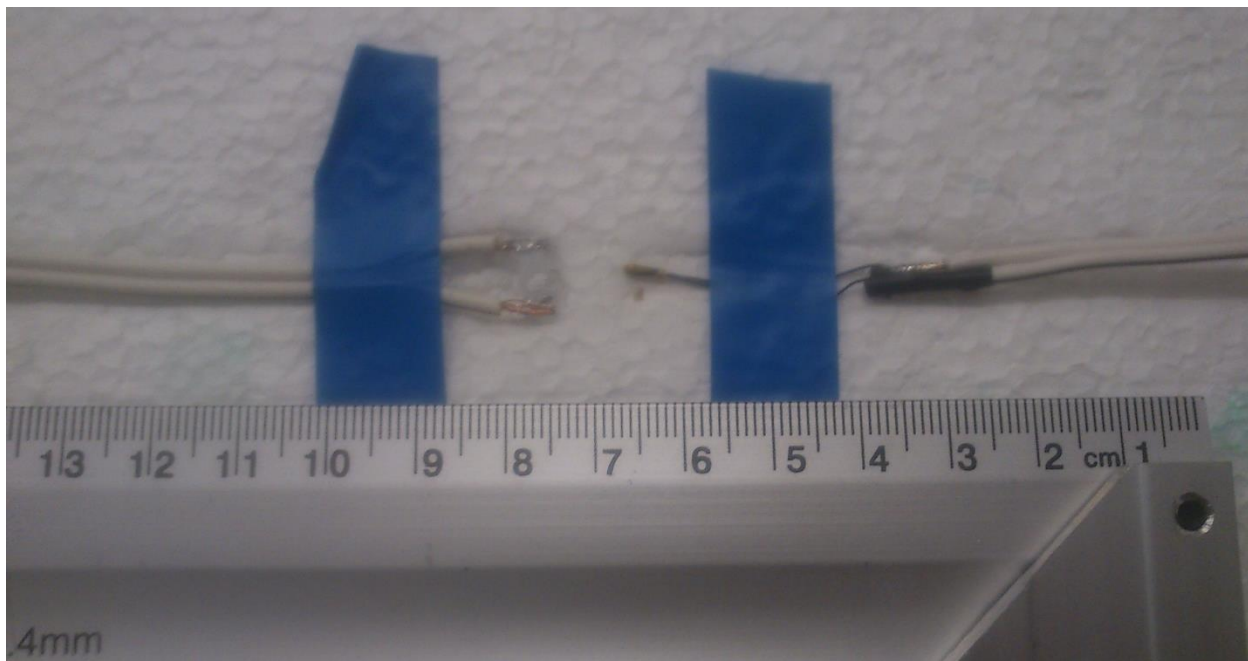
USB kabel, PC, aplikace pro záznam dat. Např: LabVIEW SignalExpress nebo LabVIEW

Vzorek polystyrenu EPS 100S

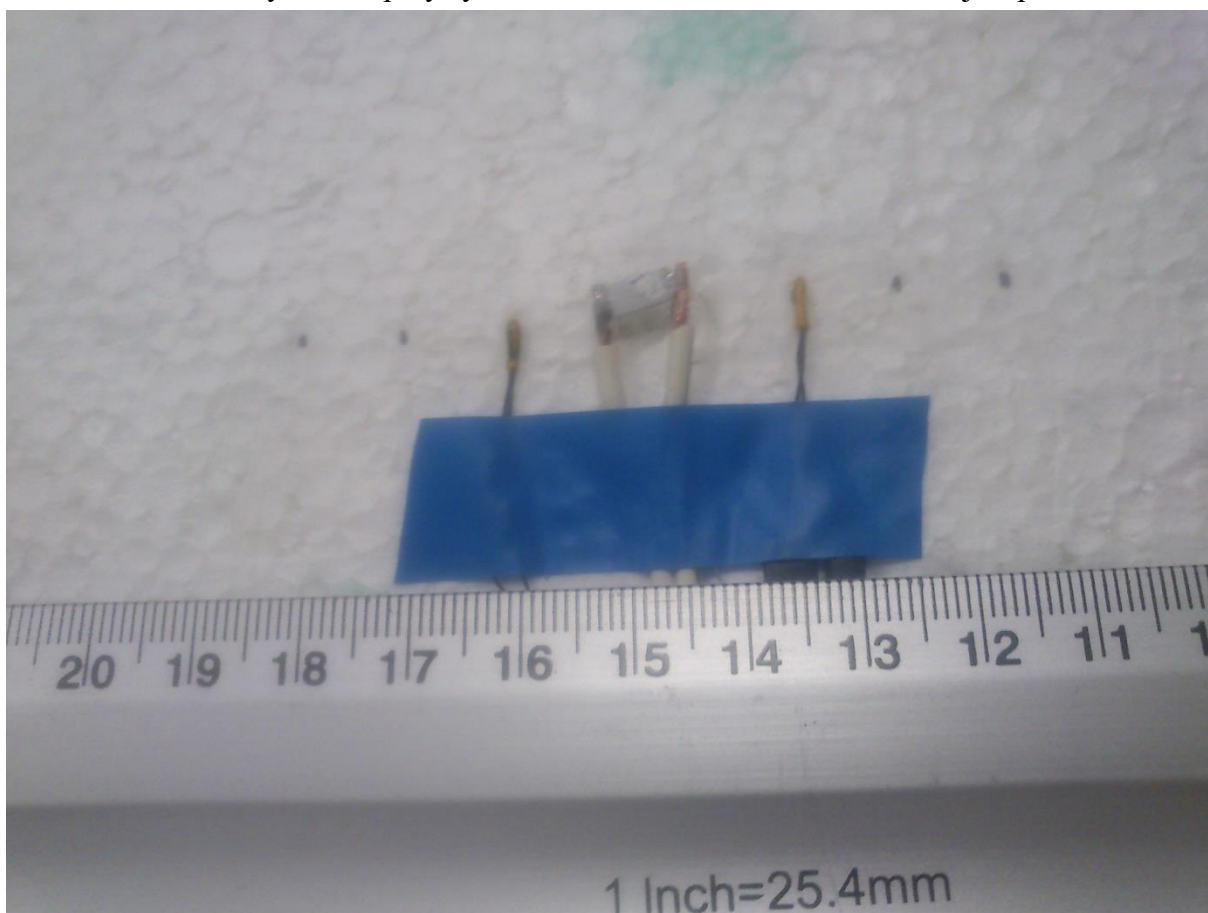
NTC termistor Vishay NTCLE305E4SB

zdroj tepla SMD rezistor YAGEO RC2512, $R = 10 \Omega$

Obrázek č. 6 Měřený vzorek polystyrenu s prvním rozmístěním zdroje tepla a termistoru



Obrázek č. 7: Měřený vzorek polystyrenu s alternativním rozmístěním zdroje tepla a termistorů



3.3 Postup měření tepelné vodivosti:

Postup měření tepelné vodivosti na vzorku polystyrenu:

1) Na polystyrenovém přípravku byl připevněn SMD odpor jako zdroj tepla a jeden nebo dva termistory v požadované vzdálenosti. Na SMD odpor a termistor můžeme nanést malé množství teplovodivé pasty která zlepší kontakt s polystyrenem. Teplovodivé pasty nesmí být příliš mnoho, aby nedocházelo k teplotnímu mostu a měření nebylo ovlivněno. V místě přívodních vodičů je vhodné do polystyrenu vytlačit malou prohlubeň, aby nevznikla vzduchová mezera po přiložení horního kusu polystyrenu.

2) Krokosvorkami se připojl multimetr Agilent 33410A k termistoru. Multimetr byl propojen USB kabelem k PC. Obdobně byl krokosvorkami připojen napájecí zdroj TTI CPX400SP k zdroji tepla (SMD odpor). Napětí na napájecím zdroji bylo nastaveno na 3,3 V. Výstup ze zdroje zatím vypnutý.

3) V PC byla zapnuta aplikace pro záznam dat, tou byl program LabVIEW signal express .V aplikaci bylo nastaveno dvou vodičové měření odporu na připojeném multimetru.

4) Zkušebně bylo zapnuto měření, dokud nedošlo k ustálení hodnot odporu termistorů. Poté bylo měření vypnuto.

5) Ve stejný okamžik bylo spuštěno měření i výstup ze zdroje (tlačítko output). V měřící aplikaci byl sledovaný čas a po uplynutí žádaného časového intervalu Δt byl vypnut výstup z napájecího zdroje. Měření multimetrem pokračovalo dál, dokud neproběhlo teplotní maximum (pro NTC termistor odporové minimum). Poté s dostatečnou časovou prodlevou, aby bylo jisté, že teplotní maximum opravdu prošlo, bylo měření vypnuto.

6) Po vypnutí vyexportovat naměřená data do tabulky ve formátu .xls pro snadné zpracování.

3.4 Měření na pórobetonu Ytong

Jako první měření jsem zopakoval experiment z bakalářské práce Jakuba Krejčího z roku 2015. [2] Účelem měření bylo otestovat správnou funkčnost měřicího systému a vyzkoušet si postup měření na funkčním vzorku.

Na povrchu vzorku pórobetonu je připevněn tranzistor jako zdroj tepla a ve vzdálenosti 1,3 cm je pevně připevněno platinové čidlo. Postup měření byl proveden dle popisu uvedeném v [2].

Parametry pórobetonu udávané výrobcem:

$$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,135 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

$$c = 1000 \text{ J/(kg}^*\text{K)}$$

Tepelná vodivost naměřená Krejčím při délce pulzu 20s

$$\lambda = 0,144 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

výrobcem udávaná hodnota tepelné vodivosti:

$$\lambda = 0,137 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

podmínky pro obě měření:

datum měření: 30. 10. 2015

teplota: 23,7°C

vlhkost:47%

tlak:1029 hPa

Tabulka č. 4, závislost tepelné vodivosti na délce pulzu, vzorek pórobeton

Δt [s]	r [m]	t_m [s]	λ [W/(m*K)]	$\delta\lambda_k$ [%]	$\delta\lambda_v$ [%]
20	0,013	105	0,148	2,63	7,88
30	0,013	115	0,142	-1,53	3,50
45	0,013	130	0,135	-6,41	-1,63

r – vzdálenost od zdroje tepla

Δt - délka tepelného pulzu ze zdroje tepla

t_m – doba dosažení teplotního maxima,

$\delta\lambda_k$ – relativní chyba, Krejčím naměřené hodnoty.

$\delta\lambda_v$ – relativní chyba od výrobcem udávané hodnoty.

Vypočtené hodnoty tepelné vodivosti z tabulky č. 4 pórobetonu Ytong jsou podobné hodnotám naměřeným Jakubem Krejčím v bakalářské práci a neliší se příliš od hodnot udávaných výrobcem. Zvětšující se chyba při délce pulzu mohla být způsobena tím, že mezi měřeními nebyly dostatečné prodlevy a vzorek nestihl úplně vychladnout. Pro výpočet tepelné vodivosti byl použit vztah č. 13. S rostoucí délkou topícího pulzu narůstá velikost teplotní vlny. Rozdíl teplot způsobený tepelnou vlnou je

Na pórobetonu bylo provedeno ještě další měření ve stejný den. Namísto platinového čidla byly použity dva termistory, které byly postupně umístěny do různých vzdáleností od zdroje tepla. Oba termistory pro konkrétní měření byly ve stejné vzdálenosti od zdroje tepla. Termistory byly umístěny na opačných stranách od zdroje tepla. Délka topného pulzu Δt byla konstantních 30s.

Tabulka č. 5 tepelné vodivosti pro různé délky od zdroje tepla, vzorek pórobeton

r [m]	Δt [s]	t_{m1} [s]	λ_1 [W/(m*K)]	t_{m2} [s]	λ_2 [W/(m*K)]	θ [K]
0,01	30	91	0,1122	113	0,0857	0.963
0,015	30	119	0,1812	126	0,1694	0.338
0,02	30	148	0,2502	134	0,2271	0.092
0,025	30	195	0,2878	187	0,3012	0.067

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt – délka tepelného pulzu

t_{m1} - doba dosažení teplotního maxima, termistor 1

t_{m2} - doba dosažení teplotního maxima, termistor 2

λ_1 – vypočtená tepelná vodivost, měřeno termistorem 1

λ_2 – vypočtená tepelná vodivost, měřeno termistorem 2

θ – nárůst teploty

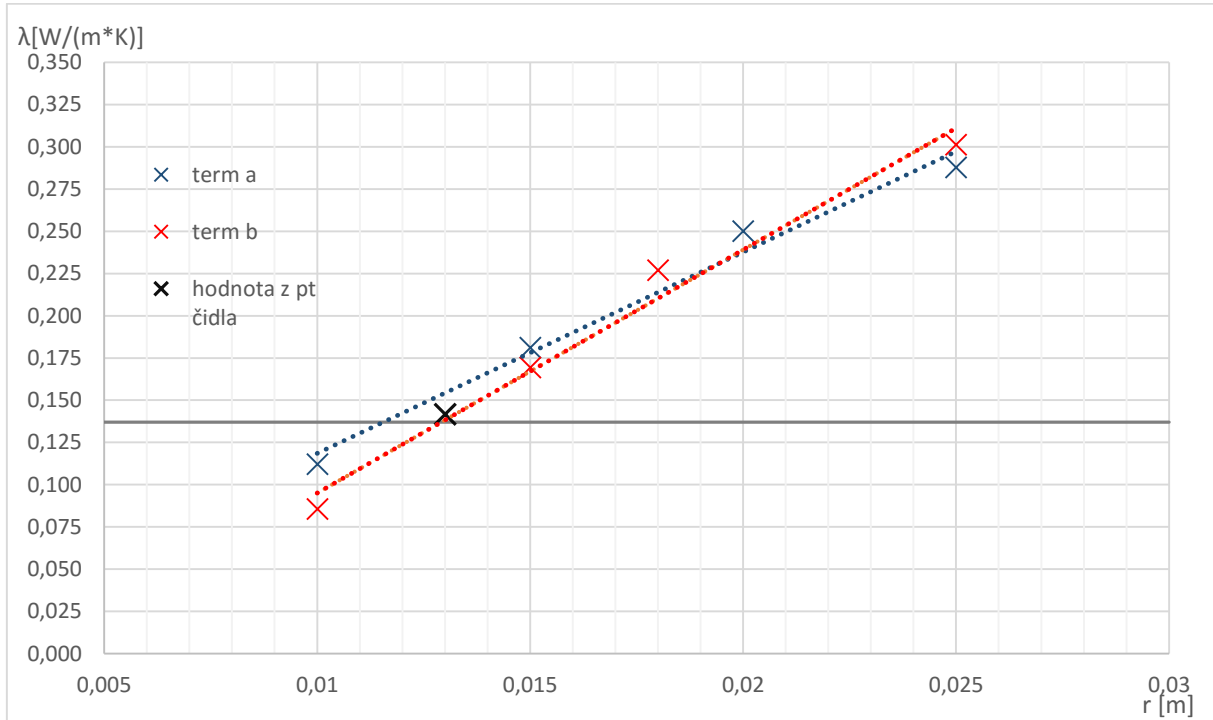
Časová korekce pro výpočet tepelné vodivosti dle vzorce č. 13. Pro hodnoty tepelné vodivosti naměřené oběma termistory dochází k lineárnímu nárůstu, přitom by tepelná vodivost dle teorie měla být konstantní pro různě vzdálenosti od zdroje tepla. Jakub Krejčí ve své bakalářské práci vliv vzdálenosti od zdroje tepla neřešil, proto na tento problém nenarazil. U hodnoty tepelné vodivosti měřená termistorem 2 pro vzdálenost 2cm došlo k posunu termistoru, vzdálenost od zdroje tepla se zmenšila na 1,8cm. Hodnota tepelné vodivosti pro konkrétní měření je vypočtena pro posunutou vzdálenost.

V grafu č. 3 je šedou čarou vyznačena hodnota tepelné vodivosti udávaná výrobcem. Černý křížek značí hodnotu tepelné vodivosti naměřenou Krejčím v jeho bakalářské práci. Červenou a modrou barvou jsou značeny hodnoty tepelné vodivosti z dat naměřenými termistory. Pro vzdálenost snímače přibližně 1,3 cm od zdroje tepla změřená tepelná vodivost odpovídá hodnotě udávané výrobcem. To je vzdálenost, kterou zvolil Jakub Krejčí ve své bakalářské práci. [2] S rostoucí vzdáleností se zvětšuje hodnota zjištěné tepelné vodivosti. To je v rozporu s očekáváním, kdy tepelná vodivost má být konstantní.

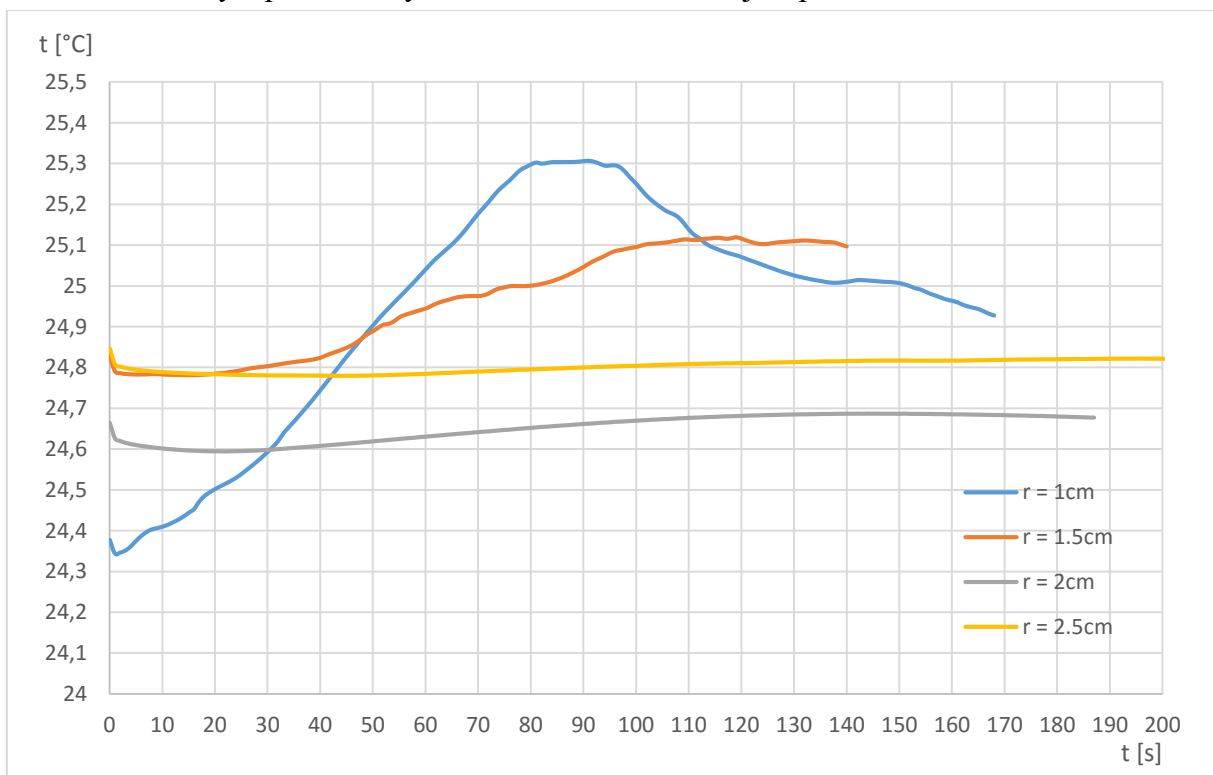
Příčinou narůstající hodnoty změřené tepelné vodivosti při změně vzdálenosti termistoru od zdroje tepla je, že teplotní vlna se šíří rychleji než jak je popsáno v teorii. Doba dosažení teplotního maxima dle teorie má narůstat kvadraticky se zvětšující se vzdáleností. Přesná příčina, proč se teplotní vlna šíří rychleji, nebyla odhalena. Pro hodnoty vzdálenosti menší než cca 1,3cm jsou vypočtené hodnoty tepelné vodivosti menší než výrobcem udávaná hodnota 0,137 Pro vzdálenost větší než 1,3 hodnoty tepelné vodivosti narůstají a jsou větší než

V grafu č. 4 vidíme průběh teplot pro různé vzdálenosti od zdroje tepla, při pulzu topení o délce 30s. Z tvaru průběhů je vidět že i přes zakrytí přípravku kartonovou krabicí proudění vzduchu ovlivňuje měření.

Graf č. 3 Tepelná vodivost pórobetonu pro různé vzdálenosti snímače od zdroje tepla



Graf č. 4 Průběhy teplot v různých vzdálenostech od zdroje tepla



3.5 Měření na vzorku polystyrenu

3.5.1 Vliv délky pulzu a volba vhodné časové korekce:

Ve dvou samostatných měřeních se ověřoval vliv délky pulzu na přesnost měření a také kvalita korekcí pro konečné délky pulzu.

Na vzorek polystyrenu byl připevněn zdroj tepla s výkonem 1W. Ve vzdálenosti 1 cm od zdroje tepla byl umístěn termistor. Zdroj tepla i termistor byly připevněny k polystyrenu lepicí páskou a přikryty druhou vrstvou polystyrenu. Délka pulzu se v obou měřeních měnila od 10 sekund do 60 sekund. Tepelná vodivost byla vypočtena v obou měřeních dvěma různými vztahy.

podmínky prvního měření:

datum měření: 13. 11. 2015

teplota: 25,3°C

vlhkost: 56%

tlak: 1024 hPa

Tabulka č. 6 Tepelná vodivost různé délky pulzů, první měření

r [m]	Δt [s]	t_{m1} [s]	λ_1 [W/(m*K)]	λ_2 [W/(m*K)]	θ [K]
0,01	10	53	0,046610	0,009045	0,95
0,01	20	56	0,025453	0,010182	1,67
0,01	30	63	0,018071	0,010437	2,68
0,01	45	75	0,012865	0,010250	4,18
0,01	60	85	0,010205	0,010357	5,47

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt - délka tepleného pulzu ze zdroje tepla

t_{m1} – doba dosažení teplotního maxima

λ_1 – výpočet tepelné vodivosti vztahem č. 14

λ_2 – výpočet tepelné vodivosti vztahem č. 13

výrobce udávaná hodnota tepelné vodivosti $\lambda = 0,037$ W/(m*K)

θ – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla

podmínky druhého měření:

datum měření: 20. 11. 2015

teplota: 24,6°C

vlhkost: 35%

tlak: 1008 hPa

Tabulka č. 7 Tepelná vodivost různé délky pulzů, druhé měření

r [m]	Δt [s]	t_m [s]	λ_1 [W/(m*K)]	λ_2 [W/(m*K)]	θ [K]
0,01	10	51	0,04679	0,00946	0,52
0,01	20	60	0,02514	0,00925	1,46
0,01	30	68	0,01774	0,00926	2,43
0,01	45	80	0,01261	0,00916	3,61
0,01	60	91	0,00996	0,00911	4,53

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt - délka tepelného pulzu ze zdroje tepla

t_{m1} – doba dosažení teplotního maxima

λ_1 – výpočet tepelné vodivosti vztahem č. 14

λ_2 – výpočet tepelné vodivosti vztahem č. 13

výrobce udávaná hodnota tepelné vodivosti $\lambda = 0,037$ W/(m*K)

θ – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla

Z tabulek a grafů je zřejmé, že v obou případech korekce podle vzorce č. 8 přináší konstantní hodnoty tepelné vodivosti a je proto vhodnější než korekce dle vzorce č. 9 proto pro další měření se využívá korekce dle vztahu č. 8.

Výsledky tepelné vodivosti v obou měřeních jsou čtvrtinové oproti výrobce udávané hodnotě. Důvodem, proč jsou hodnoty tepelné vodivosti čtvrtinové oproti výrobce udávané hodnotě je, že doba dosažení teplotního maxima tepelné vlny v materiálu neodpovídá době, za kterou by dle teoretických vzorců mělo dojít. Je to problém, který je popsán v kapitolách 3.4 a 3.5.2.

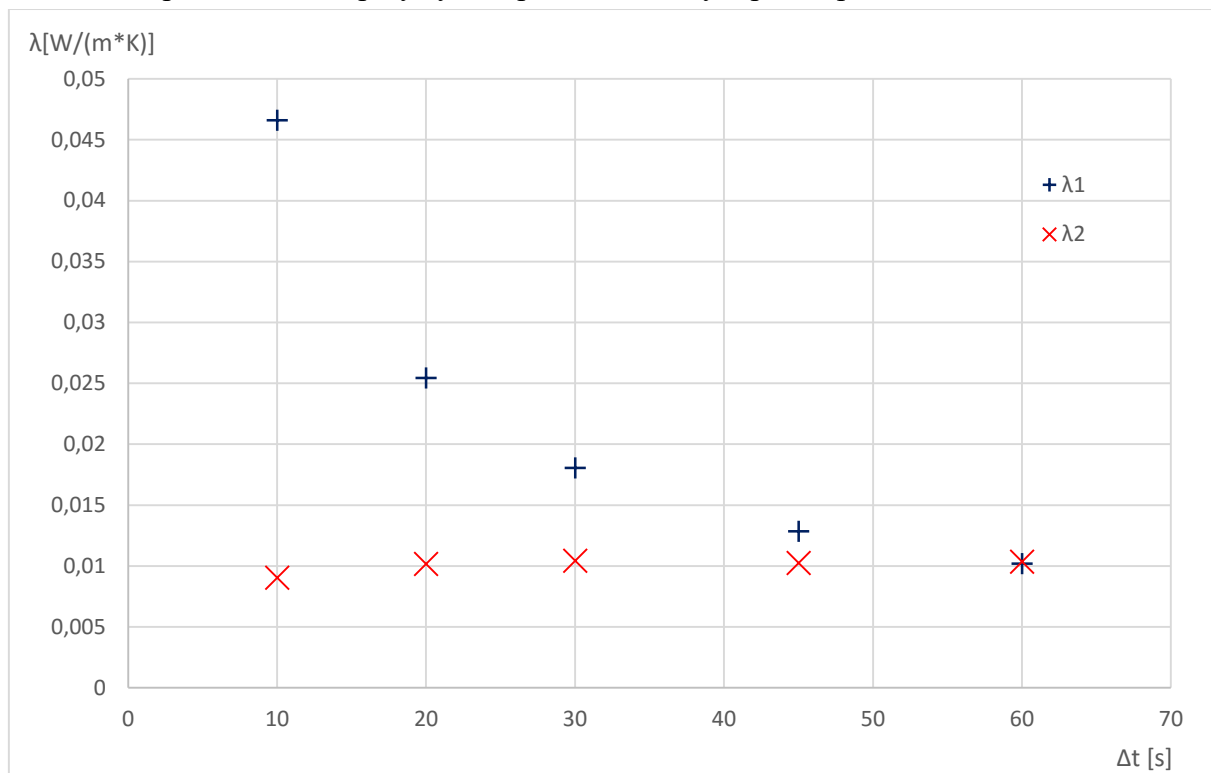
Rozdílné hodnoty naměřené tepelné vodivosti mezi první a druhou sérií měření mohly být způsobeny rozdílnou vlhkostí, případně nepřesným umístěním termistoru od zdroje v požadované vzdálenosti. Zdroj tepla nebo termistor se i přes přilepení k spodní polystyrenové vrstvě mohou pohnout při přiložení horního kusu polystyrenu a jeho zatížení.

Pro snadnější porovnání jsou vypočtené hodnoty vyneseny do grafů. V grafu č. 5 je porovnání dvou korekcí pro naměřené hodnoty v první sérii měření. A v grafu č. 6 jsou vypočtené hodnoty zobrazeny pro druhou sérii měření.

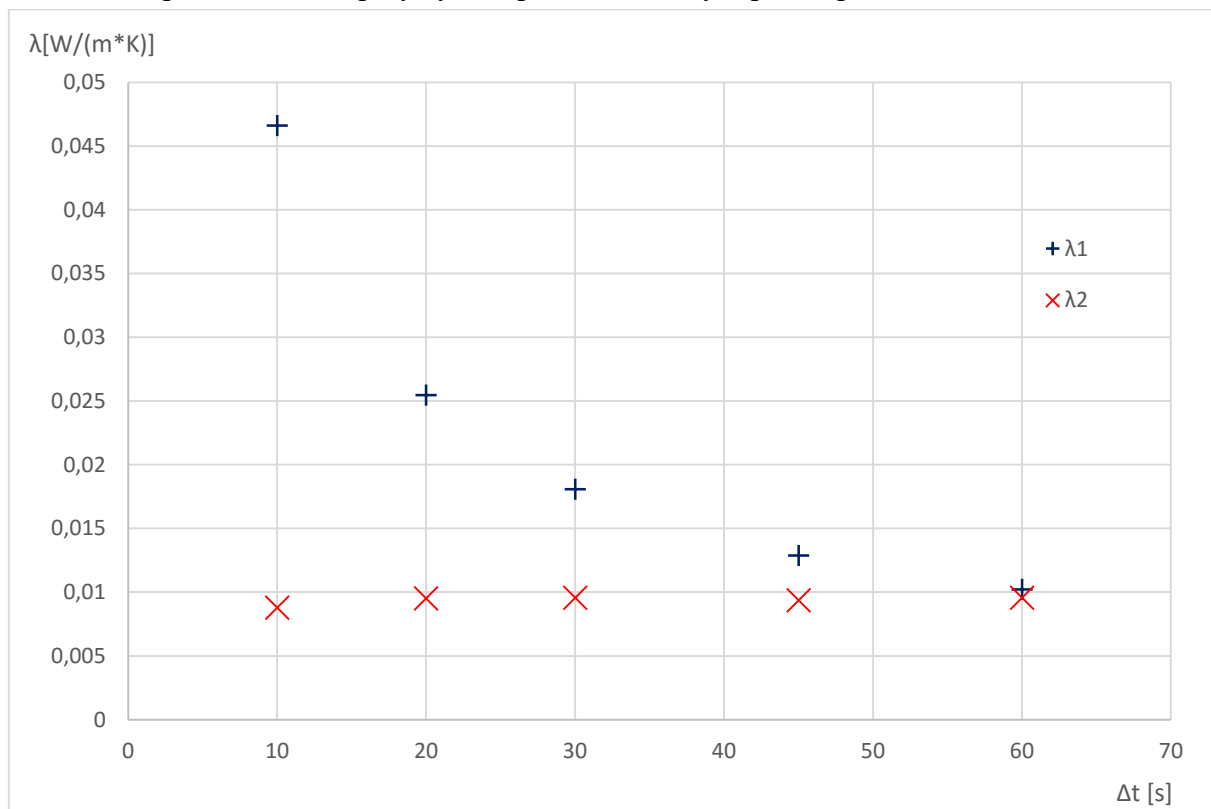
Z grafů č. 7 a 8 vidíme, že ideálním kompromisem mezi výrazností tepelné vlny a dobou celkového měření se jeví doba topícího pulzu v rozmezí od 20s do 30s. Pokud by nezáleželo na délce měření tak by bylo vhodné zvolit co nejdelší pulz.

Snížení amplitudy teplotní vlny při druhém měření je pravděpodobně způsobeno horším kontaktem mezi zdrojem tepla a polystyrenem, případně termistorem a polystyrenem. Částečný vliv na amplitudu teplotní vlny má i vlhkost, která byla při druhém měření nižší než během prvního měření.

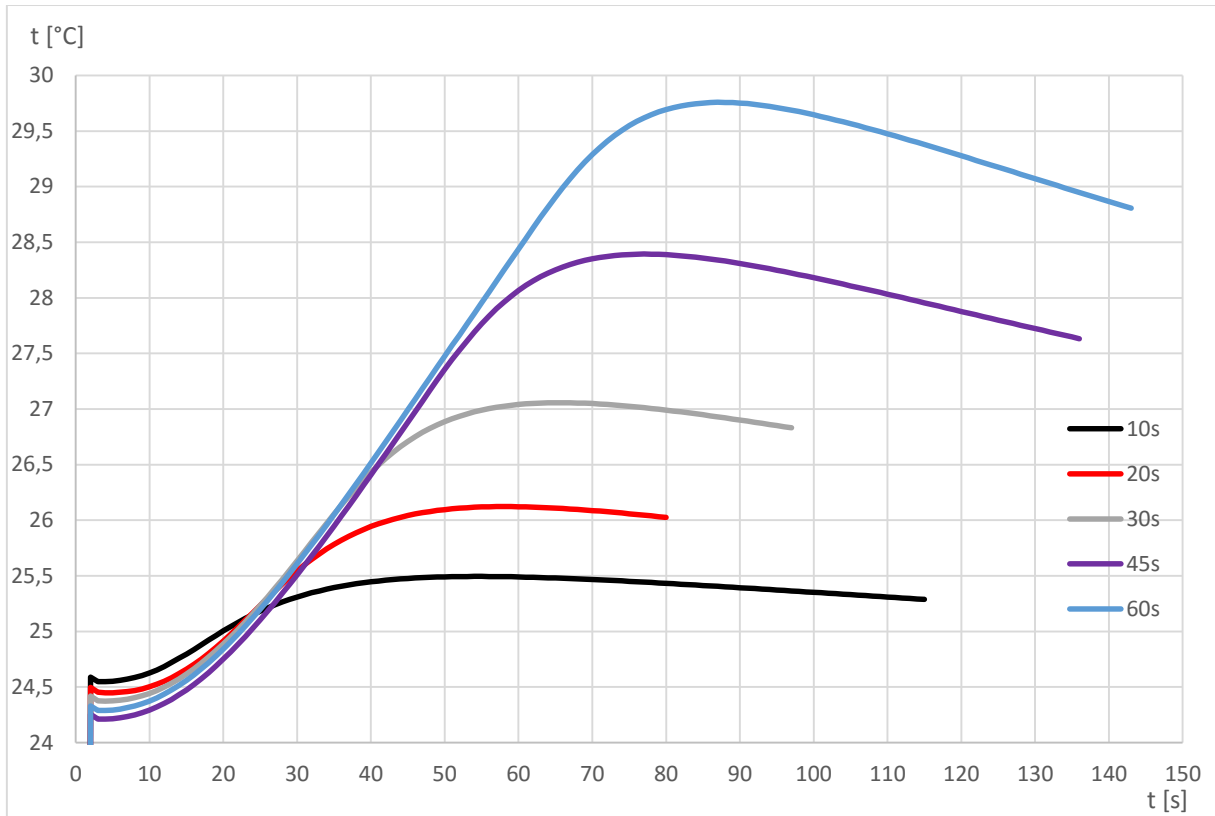
Graf č. 5 Tepelná vodivost polystyrenu pro různé délky topného pulzu, měření 1



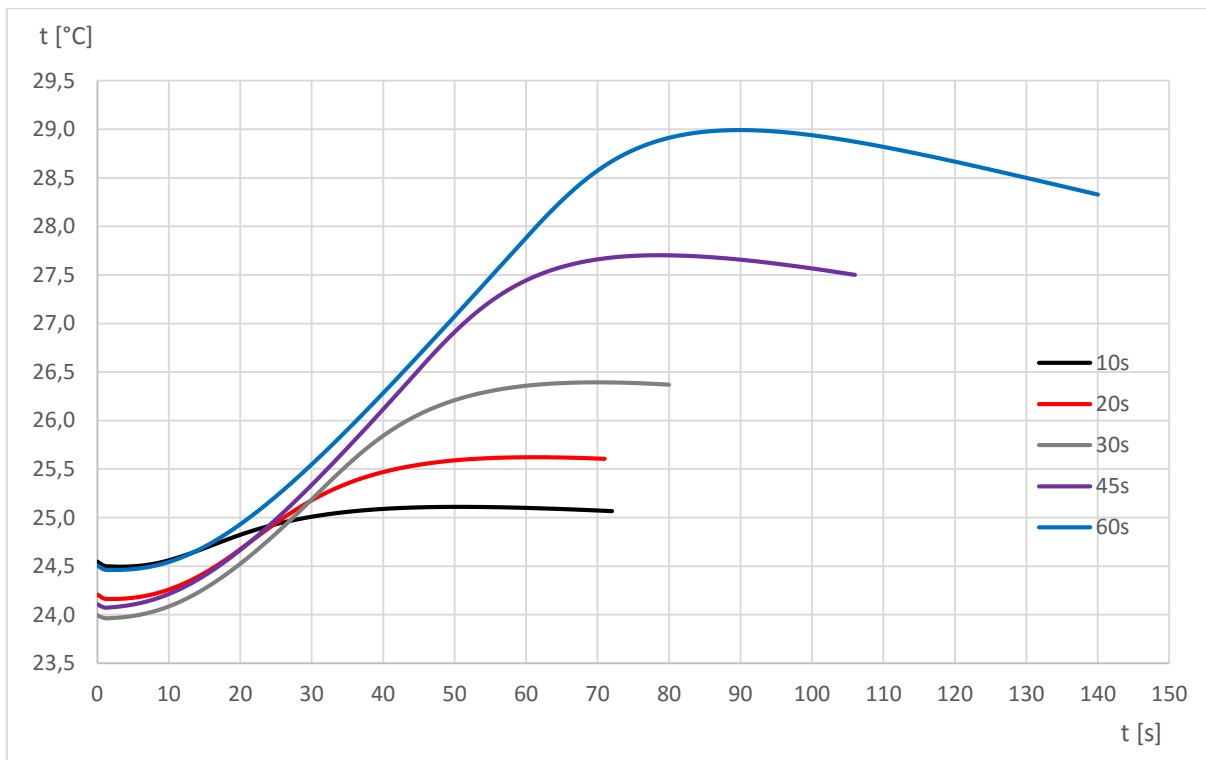
Graf č. 6 Tepelná vodivost polystyrenu pro různé délky topného pulzu, měření 2



Graf č. 7 Průběhy teplot pro různé délky pulzu ve vzdálenosti 1cm, první měření



Graf č. 8 Průběhy teplot pro různé délky pulzu ve vzdálenosti 1cm, druhé měření



3.5.2 Vliv vzdálenosti od zdroje tepla.

Měření bylo provedeno na vzorku polystyrenu EPS 100. Délka tepelného pulzu byla 30 s a výkon tepelného zdroje byl 1W. Vzdálenost termistoru od zdroje tepla byla od 1cm do 4 cm. Rozsah vzdáleností 1cm až 4cm byl zvolen, protože pro menší vzdálenosti dorazí tepelná vlna velmi rychle a klesá přesnost měření. Ve vzdálenosti větší než 4 cm je amplituda tepelné vlny prostupující vzorkem už příliš malá, aby se dalo spolehlivě určit teplotní maximum. Pro výpočet tepelné vodivosti je použit vztah č. 8. Uspořádání použitých prvků dle obrázku č. 1. Opět byly provedeny dvě série měření s časovým odstupem několika dní.

podmínky prvního měření:

datum měření: 13. 11. 2015

teplota: 25,3°C

vlhkost: 56%

tlak: 1024 hPa

podmínky druhého měření:

datum měření: 20. 11. 2015

teplota: 24,6°C

vlhkost: 35%

tlak: 1008 hPa

Tabulka č. 8 Tepelná vodivost polystyrenu pro různé vzdálenosti termistoru od zdroje tepla.

r [m]	Δt [s]	t_{m1} [s]	t_{m2} [s]	λ_1 [W/(m*K)]	λ_2 [W/(m*K)]	θ_1 [K]	θ_2 [K]
0,01	30	63	70	0,010437	0,00886	2,68	2,43
0,02	30	145	136	0,013444	0,01452	0,89	0,93
0,03	30	211	211	0,019668	0,01967	0,37	0,43
0,04	30	315	278	0,022634	0,02587	0,17	0,16

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt - délka tepelného pulzu ze zdroje tepla

t_{m1} – doba dosažení teplotního maxima, první měření

t_{m2} – doba dosažení teplotního maxima, druhé měření

λ_1 – vypočtené hodnoty tepelné vodivosti, první měření

λ_2 – vypočtené hodnoty tepelné vodivosti, druhé měření

θ_1 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla, měření 1

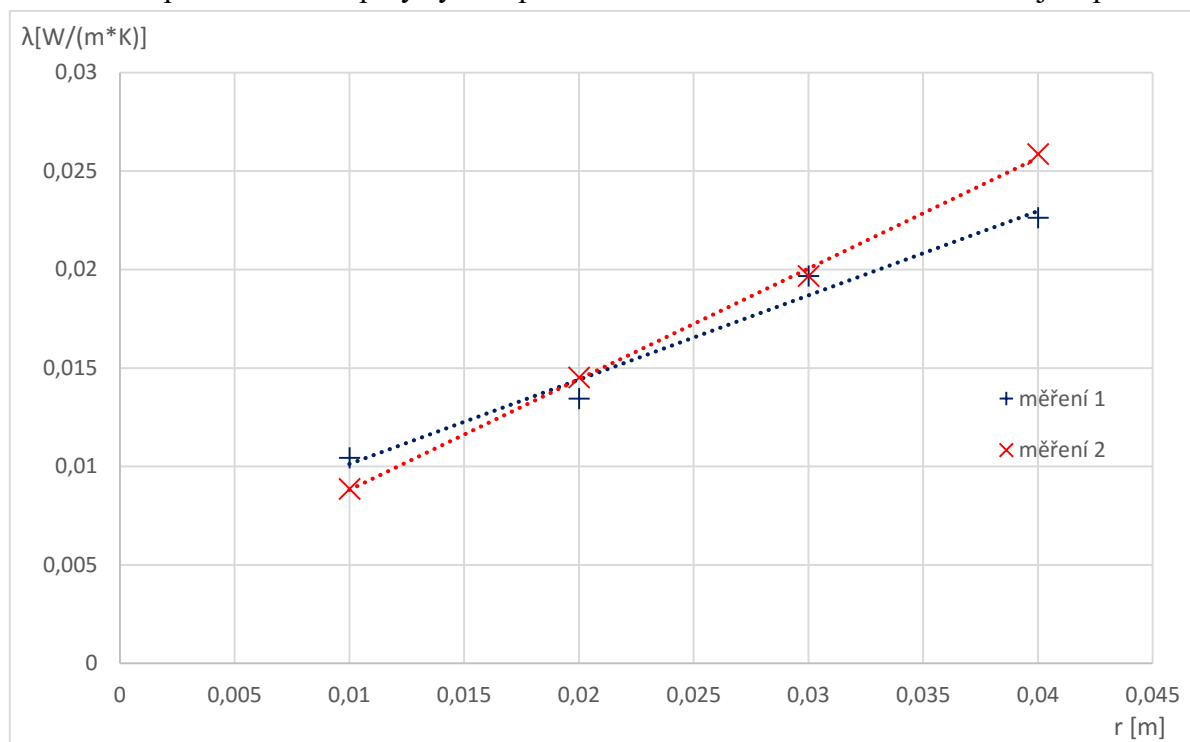
θ_2 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla, měření 2

V grafu č. 9 a v tabulce č. 8 vidíme, že s rostoucí vzdáleností od termistoru a od zdroje tepla narůstá hodnota vypočtené tepelné vodivosti. To je v rozporu s očekávanými výsledky, kdy tepelná vodivost by měla být konstantní pro různé vzdálenosti. Je to stejný problém jako při měření tepelné vodivosti na vzorku pórobetonu Ytong. Příčina tohoto problému je, že s rostoucí vzdáleností by měla kvadraticky narůstat doba dosažení teplotního maxima. Z tabulky č. 8 vidíme, že doba dosažení teplotního maxima narůstá téměř lineárně. Tento problém způsobuje, že vypočtená hodnota tepelné vodivosti se zvětšující se vzdáleností narůstá.

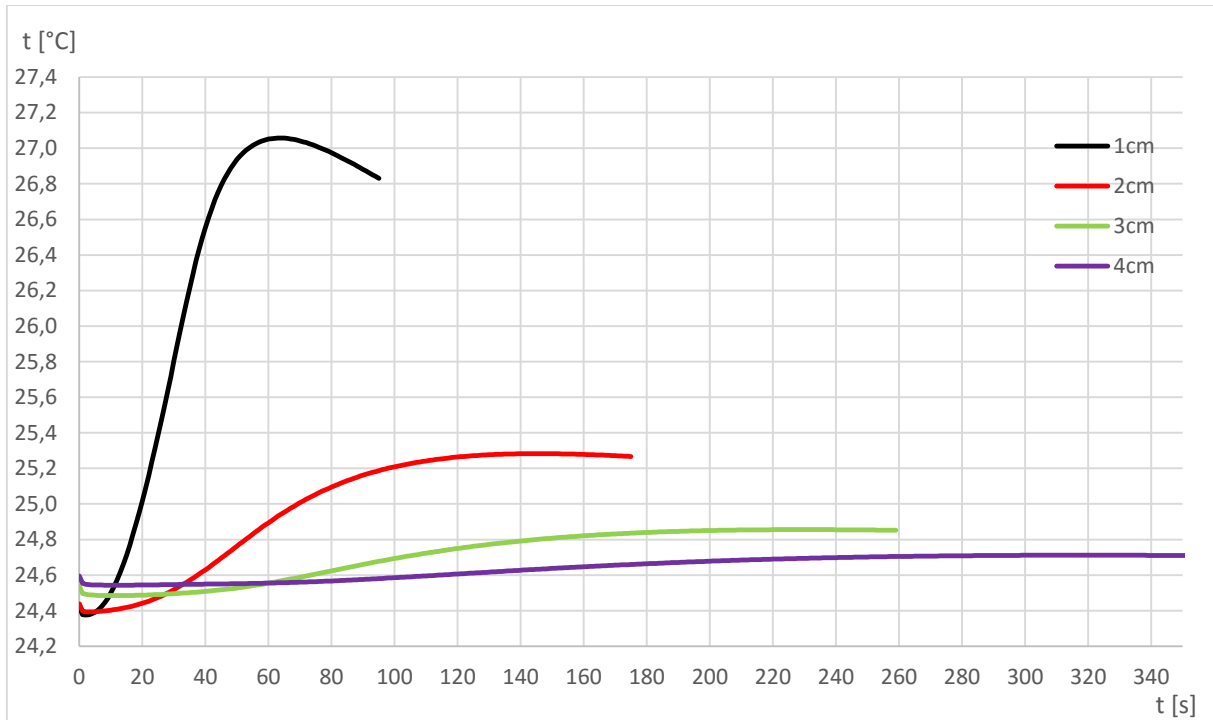
Rozdíl naměřených hodnot tepelné vodivosti mezi prvním a druhým měřením může být způsobeno nepřesností při umístění termistoru do požadované vzdálenosti od zdroje tepla. I malá nepřesnost v umístění termistoru způsobí značný rozdíl v tepelné vodivosti.

Z grafů č. 10 a 11 vidíme, že se zvětšující se vzdáleností od zdroje tepla výrazně klesá hodnota teplotního maxima. Vhodnou vzdáleností pro měření tepelné vodivosti by byla vzdálenost od 1cm do 2cm. V tomto rozmezí je teplotní maximum dostatečně výrazné, doba dosažení teplotního maxima není příliš dlouhá. Při menší vzdálenosti se výrazněji projevuje vliv přesnosti měření doby dosažení teplotního maxima.

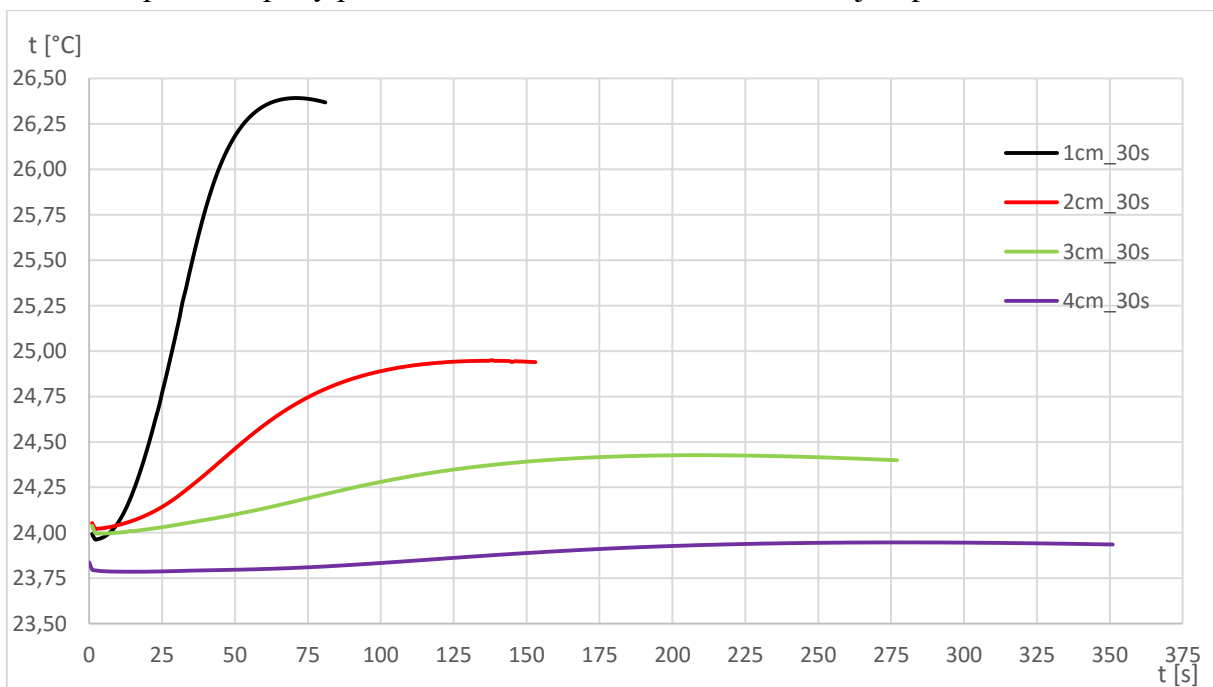
Graf č. 9 Tepelná vodivost polystyrenu pro různé vzdálenosti termistoru od zdroje tepla.



Graf č. 10 průběh teploty pro různé vzdálenosti termistoru od zdroje tepla., měření 1



Graf č. 11 průběh teploty pro různé vzdálenosti termistoru od zdroje tepla., měření 2



3.5.3 Zjištění vlivu kvality přenosu tepla ze zdroje do polystyrenu a z polystyrenu do termistoru

Při prvních dvou měřeních byl zdroj tepla a termistor pouze vložen mezi dva kusy polystyrenu. Přívodní vodiče i samotný zdroj tepla a termistor svou tloušťkou způsobovaly horší přilehnutí horního kusu polystyrenu, proto vznikla mezi kusy polystyrenu vzduchová mezera ovlivňující výsledky měření.

Proto v dalším měření byly v místech přívodních vodičů ve spodní vrstvě polystyrenu vytlačeny malé rýhy, ve které jsou přívodní vodiče uloženy, umožňující lepší přilehnutí horního kusu polystyrenu. Taktéž na zdroj tepla i termistor byla z obou stran nanese malá vrstva teplovodivé HTC 35SL s tepelnou vodivostí $1,35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Teplovodivé pasty nesmí být nanese příliš velké množství, aby roztečená pasta netvořila tepelný most a nevnášela další chybu do měření. Uspořádání použitých prvků dle obrázku č. 1. Pro výpočet tepelné vodivosti je použit vztah č. 8.

podmínky měření:

datum měření: 20. 11. 2015

teplota: $24,6^\circ\text{C}$

vlhkost: 35%

tlak: 1008 hPa

Tabulka č. 9 Tepelná vodivost po zlepšení přestupu tepla.

r [m]	Δt [s]	t_{m1} [s]	t_{m2} [s]	λ_1 [W/(m*K)]	λ_2 [W/(m*K)]	θ_1 [K]	θ_2 [K]
0,01	10	51	72	0,00946	0,00639	0,52	0,87
0,01	20	60	79	0,00925	0,00645	1,46	1,74
0,01	30	68	85	0,00926	0,00668	2,43	2,67
0,01	45	80	102	0,00916	0,00618	3,61	4,01
0,01	60	91	110	0,00911	0,00652	4,53	5,02

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt - délka tepleného pulzu ze zdroje tepla

t_{m1} – doba dosažení maxima, před úpravou

t_{m2} – doba dosažení maxima, po úpravě

λ_1 – hodnoty tepelné vodivosti získané před úpravou

λ_2 – hodnoty tepelné vodivosti získané po úpravě

θ_1 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla, před úpravou

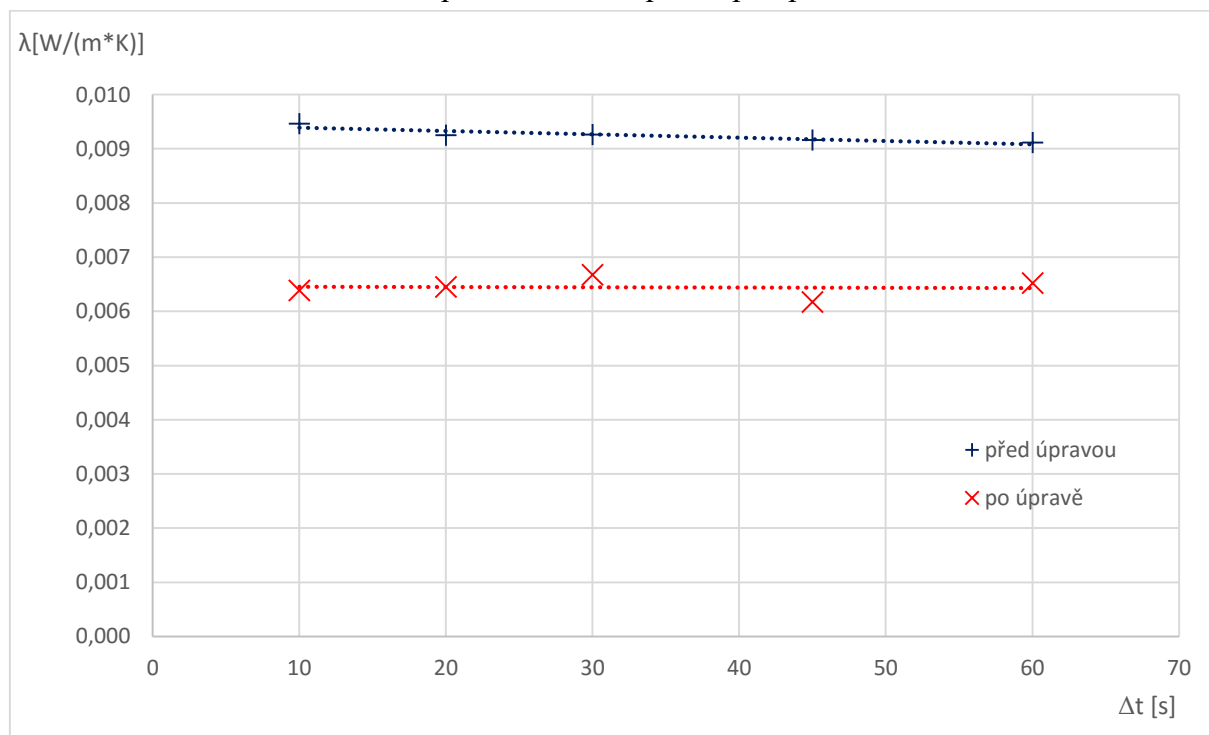
θ_2 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla, po úpravě

V grafu č. 12 dobře vidíme, že úprava měřeného vzorku nanesením teplovodivé pasty a odstranění vzduchové mezery způsobené přívodními vodiči snižuje hodnotu naměřené tepelné vodivosti v průměru o 30%. Tento rozdíl je v rozporu s očekávaným výsledkem. Odstraněním vzduchové mezery, má vzduch menší tepelnou vodivost než polystyren $0,024 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [6], a zlepšením přenosu tepla mezi zdrojem tepla a polystyrenem by nemělo dojít k zpomalení teplotní vlny. Měření před a po úpravě byla provedena ve stejný den krátce po sobě, proto vliv vlhkosti na obě měření je stejný.

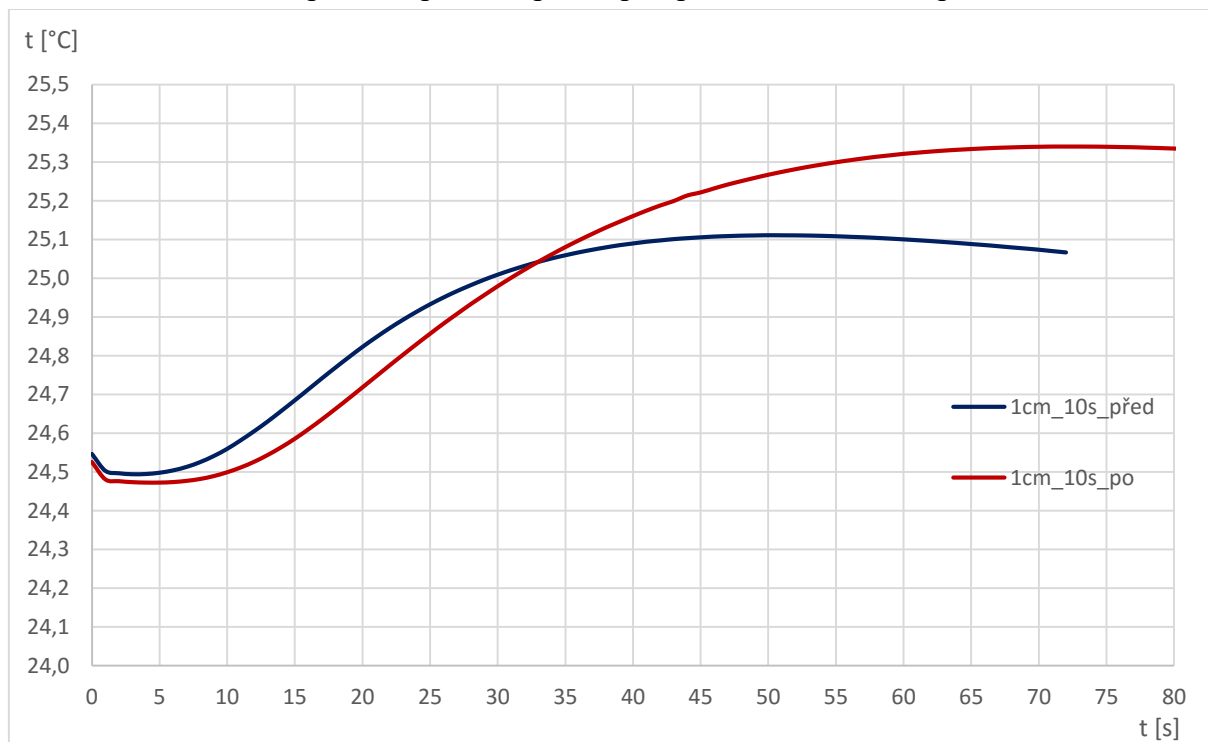
Úprava vzorku přináší konstantní snížení tepelné vodivosti pro všechny naměřené hodnoty, je možné snadno pomocí matematické korekce upravit vypočtené hodnoty. V rámci jedné série měření je třeba dodržovat jednu variantu úpravy měřeného vzorku, protože výše zmíněná úprava vzorku značně ovlivní naměřené hodnoty.

Nanesení teplovodivé pasty na zdroj tepla a termistor zvětšilo hodnotu amplitudy teplotní vlny. Pro kratší délky tepelných pulzů je vliv výraznější než u dlouhých tepelných pulzů.

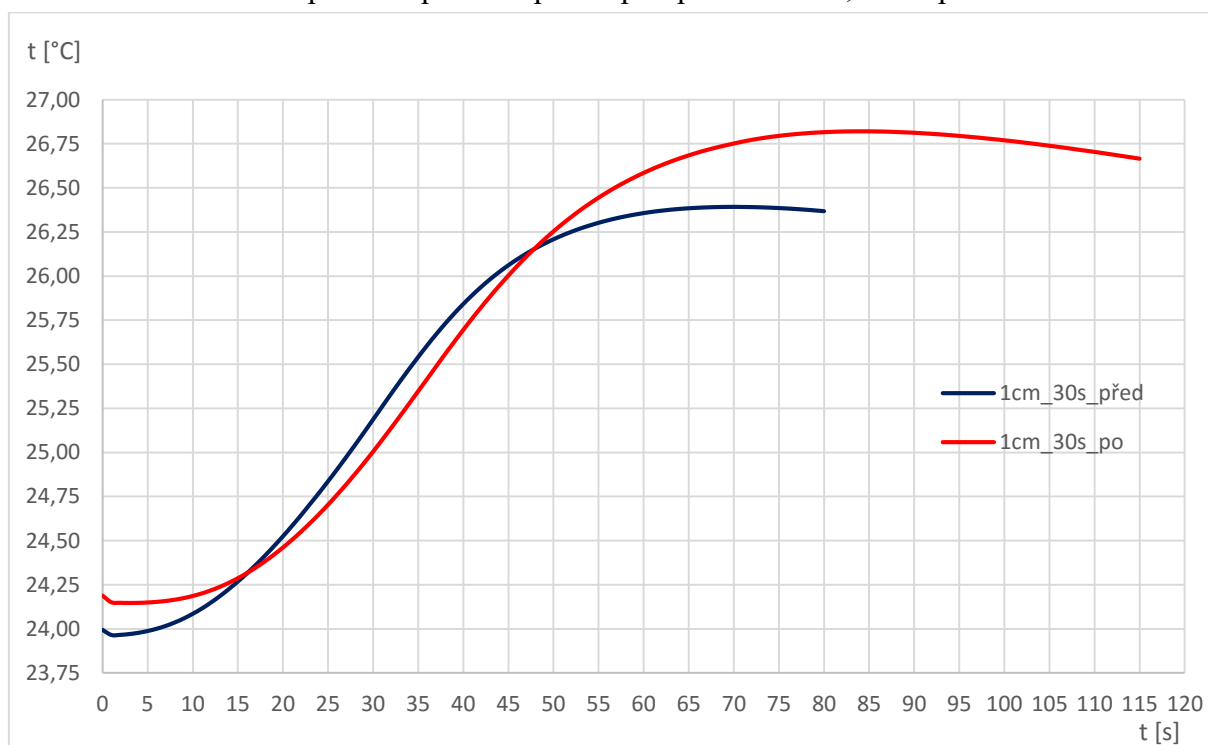
Graf č. 12 Porovnání naměřené tepelné vodivosti před a po úpravě vzorku.



Graf č. 13 Porovnání teplotních průběhů před a po úpravě vzorku, délka pulzu 10s.



Graf č. 14 Porovnání teplotních průběhů před a po úpravě vzorku, délka pulzu 30s



3.5.4 Vliv uspořádání vodičů

V této kapitole se zabývám vlivem uspořádání vodičů, termistorů a zdroje tepla, na naměřené hodnoty tepelné vodivosti. V předchozích měřeních bylo uspořádání jako na obrázku č. 1. v tomto uspořádání z jedné stran vedou přívodní vodiče k zdroji tepla, z opačné strany vedou vodiče k termistoru. Mezi termistorem a zdrojem tepla je definovaná vzdálenost.

V zapojení alternativním uspořádáním dle obrázku č. 2 vedou přívodní vodiče zdroje tepla a termistorů z jedné strany měřeného vzorku. Termistory jsou umístěny v definované vzdálenosti od zdroje tepla. V tomto uspořádání je na zdroj tepla a termistory nanášena teplovodivá pasta a přívodní vodiče jsou uloženy v drážce, aby nevznikala vzduchová mezera mezi dvěma kusy polystyrenu.

podmínky měření:

datum měření: 20. 11. 2015

teplota: 24,6°C

vlhkost: 35%

tlak: 1008 hPa

Tabulka č. 10 Vliv uspořádání vodičů na naměřené hodnoty tepelné vodivosti.

r [m]	Δt [s]	t_{m1} [s]	t_{m2} [s]	λ_1 [W/(m*K)]	λ_2 [W/(m*K)]	θ_1 [K]	θ_2 [K]
0,01	10	72	75	0,00639	0,00601	0,87	1,98
0,01	20	79	83	0,00645	0,00582	1,74	3,34
0,01	30	85	88	0,00668	0,00596	2,67	5,20
0,01	45	102	98	0,00618	0,00603	4,01	7,74
0,01	60	110	105	0,00652	0,00644	5,02	9,99

r – vzdálenost termistoru od zdroje tepla

Δt - délka tepelného pulzu ze zdroje tepla

t_{m1} – doba dosažení maxima s uspořádáním vodičů dle obr. 6

t_{m2} – doba dosažení maxima s uspořádáním vodičů dle obr. 7

λ_1 – hodnoty tepelné vodivosti získané s uspořádáním vodičů dle obr. 6

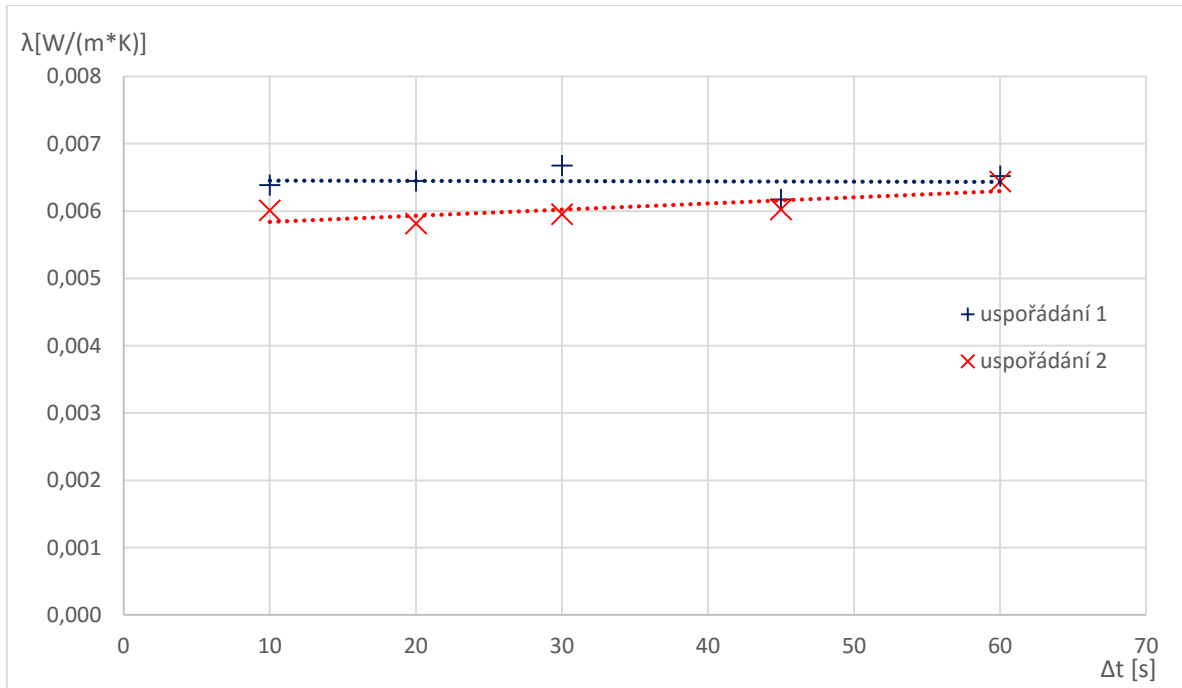
λ_2 – hodnoty tepelné vodivosti získané s uspořádáním vodičů dle obr. 7

θ_1 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla s uspořádáním vodičů dle obr. 6

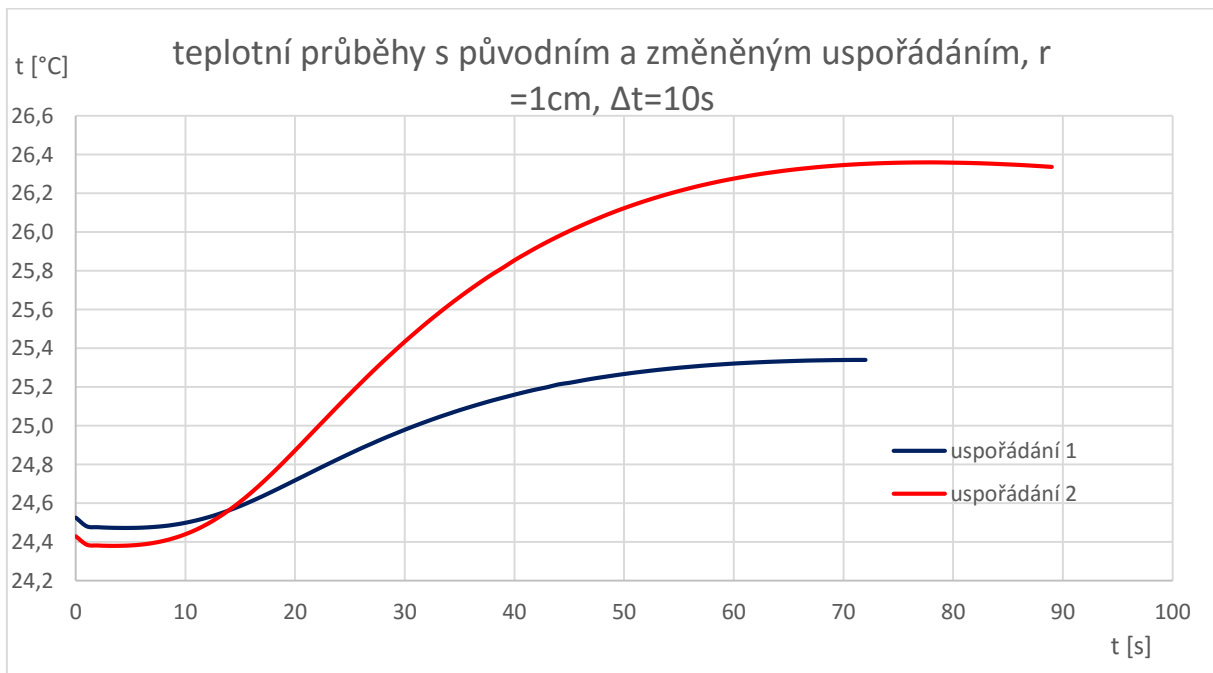
θ_2 – nárůst teploty v definované vzdálenosti od zdroje tepla s uspořádáním vodičů dle obr. 7

Z tabulky 10 a grafu č. 15 je patrné, že způsob uspořádání vodičů má vliv na výsledky měření. Při uspořádání dle obrázku č. 2 je doba dosažení teplotního maxima delší a hodnoty tepelné vodivosti trochu nižší. Tento rozdíl může být způsoben nepřesností umístění termistoru do požadované vzdálenosti. Se zvětšující se délkou tepelného pulzu se snižuje rozdíl mezi jednotlivými způsoby umístění přívodních vodičů. Vhodné je tedy dodržovat během měření stejné uspořádání.

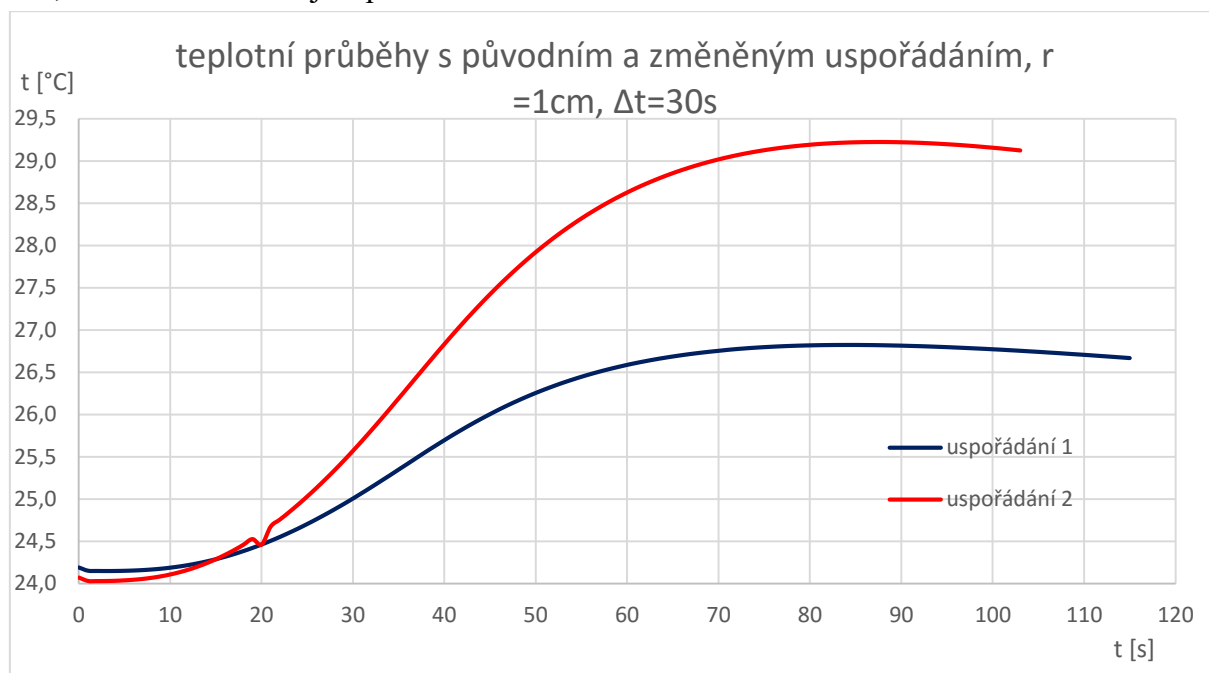
Graf č. 15 Vliv uspořádání vodičů, termistorů a zdroje tepla na naměřené hodnoty



Graf č. 16 Porovnání teplotních průběhů při prvním a druhém způsobu uspořádání, délka pulzu 10s, vzdálenost od zdroje tepla 1cm.



Graf č. 17 Porovnání teplotních průběhů při prvním a druhém způsobu uspořádání, délka pulzu 10s, vzdálenost od zdroje tepla 1cm.



3.6 Experiment šíření tepla

3.6.1 Popis přípravku a postup měření

Přípravek pro měření šíření teplotní vlny materiálem se skládá z extrudovaného polystyrenu STARLON. Tento polystyren je běžně využívaný jako zvuková a teplotní izolace pod plovoucí podlahy. Ten byl nařezán na díly 250mm x 250mm x 3mm. Díly byly naskládány na sebe. Na čtvrté vrstvě shora byl do středu umístěn zdroj tepla ve formě SMD odporu YAGEO RC2512, $R = 10\Omega$ se ztrátovým výkonem 1W. SMD odpor byl zvolen pro malé rozměry, dostatečný ztrátový výkon a snadnost nastavení požadovaného výkonu. Do každé druhé další vrstvy byl na střed umístěn termistor Vishay model NTCLE305E4SB. Celkem bylo použito 9 termistorů. Pod posledním termistorem zbývalo ještě několik vrstev polystyrenu, aby byl omezen vliv okolního prostředí. Ze stejného důvodu nebyl umístěn zdroj tepla na vrchní vrstvu. Celý přípravek byl zatížen, aby mezi jednotlivými vrstvami nevznikaly vzduchové mezery.

Nejprve byl připojen SMD odpor k napájecímu zdroji. Na zdroji se nastavilo stejnosměrné napětí 2 V, výstup ze zdroje byl vypnutý, dokud nebylo spuštěno měření. Termistory se připojily k měřicí kartě v ústředně Agilent. Měřicí ústředna se propojila přes GPIB/USB převodník k počítači. K záznamu a nastavení ústředny byla použita aplikace BenchLink Data Logger. V aplikaci BenchLink, pro kanály na kterých jsou připojeny termistory, bylo nastaveno dvouvodičové měření odporu s přesností 6 ½ digitu a automatickou volbou rozsahu. Perioda měření hodnot odporu termistorů byla nastavena 1s.

Současně se spuštěním měření se aktivuje výstup ze zdroje. Výstup z napájecího zdroje je aktivní na požadovanou dobu, například 60s poté je vypnut. Měření odporu termistorů pokračuje dále, dokud i na nejbližším termistoru od zdroje tepla neproběhne teplotní vlna. Poté je možné vypnout měření a uložit naměřená data. Průběhy odporů je vhodné sledovat na grafu v programu BenchLink pro snadné rozpoznání, zda teplotní vlna už proběhla.

Výrobce polystyrenu STARLON udávané parametry: [12]

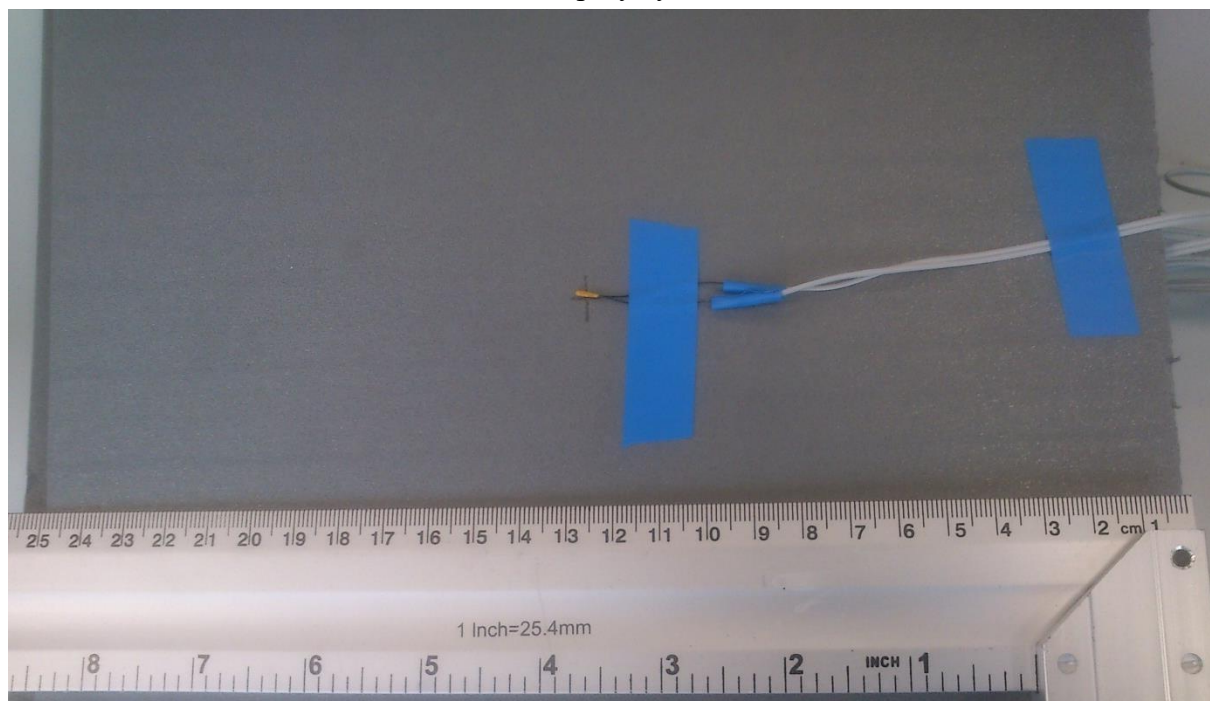
$$\rho = 28 - 38 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,0298 \text{ W/(m}^*K)$$

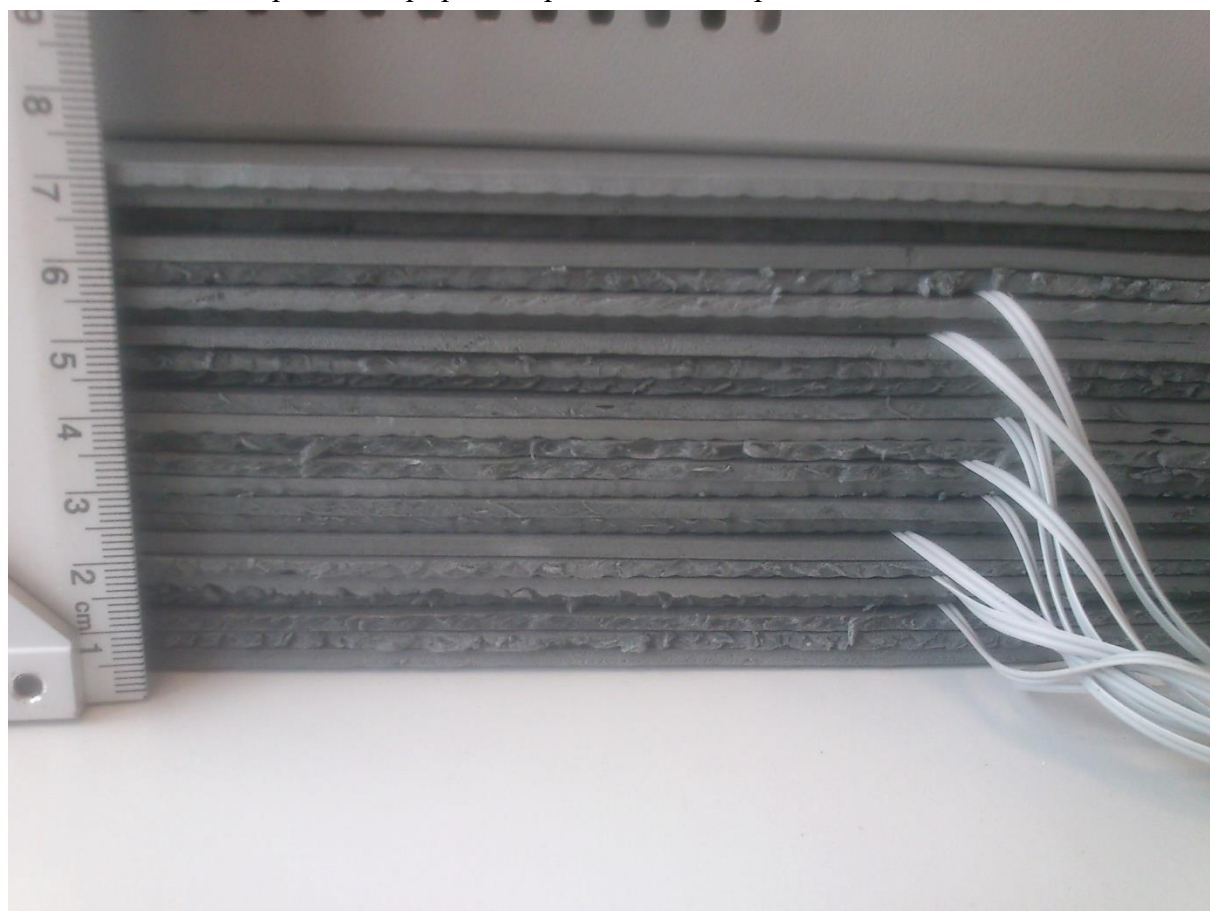
Seznam použitých přístrojů a přípravků

Zdroj:	HP E3631A
měřicí ústředna	Agilent 34970A
software pro záznam dat	BenchLink Data Logger
zdroje tepla	YAGEO RC2512, $R = 10\Omega$
NTC termistor	Vishay NTCLE305E4SB
převodník GPIB/USB, GPIB kabel, USB kabel	

Obrázek č. 8: Umístění termistoru na vrstvě polystyrenu



Obrázek č. 9: Boční pohled na přípravek, přívodní vodiče pod sebou



3.6.2 Experiment šíření tepla – vliv vzdálenosti na dobu teplotního maxima

Byla provedena měření, jejichž cílem bylo zjistit jaká je závislost doby teplotního maxima na vzdálenosti od zdroje tepla. Bylo umístěno devět termistorů v postupně se zvětšující vzdálenosti od 6mm do 54mm. Vzdálenosti mezi termistory byly 6 mm. Měření bylo na přípravku z extrudovaného polystyrenu STARLON. Z něj byly nařezány destičky 25cm x25cm o tloušťce 3mm. Jako zdroj tepla byl použit SMD rezistor se ztrátovým výkonem 1W. Délka topného pulzu byla 60s.

podmínky prvního měření:

datum měření: 6. 4. 2016

teplota: 25,7C

vlhkost: 63%

tlak: 1004 hPa

podmínky druhého měření:

datum měření: 20. 4. 2016

teplota: 25,1C

vlhkost: 31%

tlak: 1028 hPa

Tabulka č. 11 Doba dosažení teplotního maxima a nárůst teploty pro různé vzdálenosti od zdroje tepla, první a druhé měření

r [m]	t _{max2} [s]	θ ₂ [°C]	t _{max1} [s]	θ ₁ [°C]	δ _{tmax} [%]	δ _θ [%]
0,06	75	14,81	75	14,96	0	1,0
0,012	126	4,66	122	4,88	-2,9	4,5
0,018	185	2,38	187	2,20/	0,9	-4,4
0,024	263	1,26	263	1,16	0,1	-8,6
0,030	386	0,758	357	0,63	-8,2	-20,3
0,036	506	0,495	451	0,36	-12,2	-37,5
0,042	642	0,329	552	0,22	-16,4	-49,5
0,048	760	0,204	629	0,13	-20,8	-56,9
0,054	819	0,101	666	0,07	23,0	-44,3

r vzdálenost od zdroje tepla

t_{max1} doba dosažení teplotního maxima, první měření

t_{max2} doba dosažení teplotního maxima, druhé měření

θ₁ nárůst teploty, první měření

θ₁ nárůst teploty, druhé měření

δ_{tmax} relativní chyba doby teplotního maxima

δ_θ relativní chyba nárůstu teploty

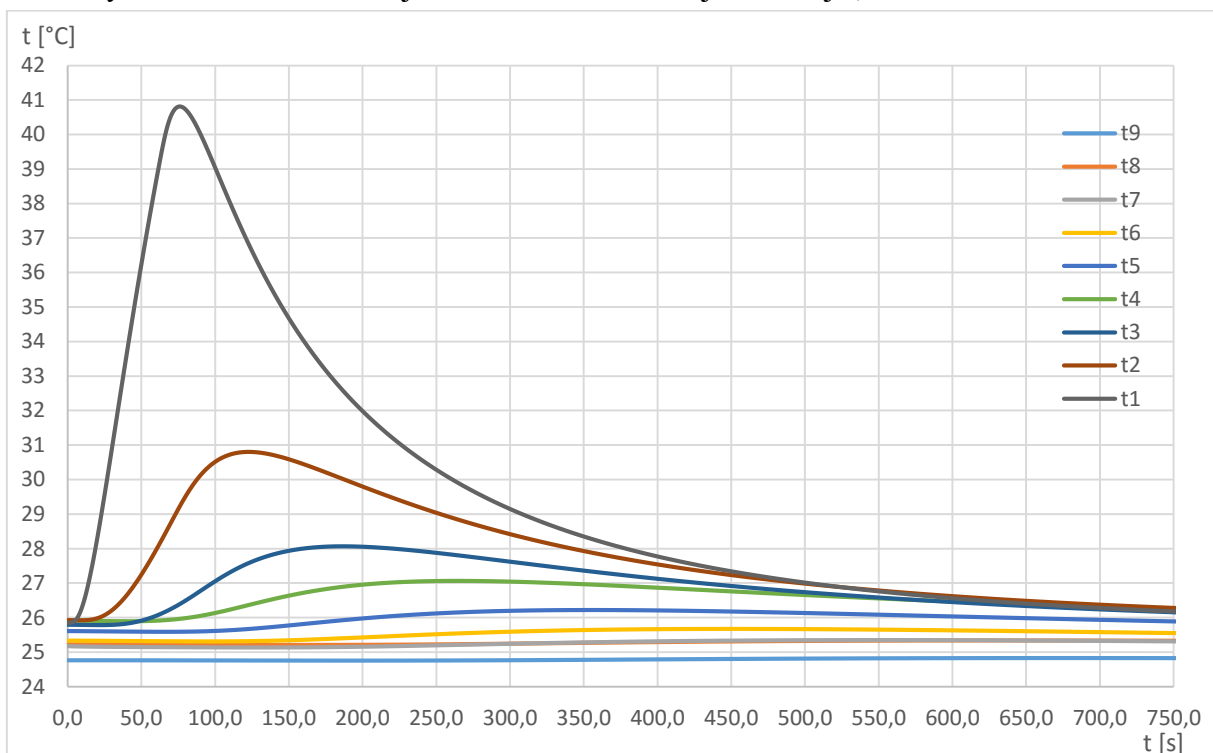
Z tabulky č. 11 vidíme, že s narůstající vzdáleností prudce klesá amplituda teplotní vlny. Pro větší vzdálenosti je velikost teplotní vlny velmi malá, řádově desetiný kelvinu. Se zvětšující se vzdáleností roste doba dosažení teplotního maxima. U malých vzdáleností do 30 mm jsou teploty i doby dosažení maxima podobné v případě obou měření, se zvětšující se vzdáleností se naměřené hodnoty začínají výrazně lišit.

V grafu č. 18 jsou zobrazeny průběhy teplot ve vzdálenosti od 6 mm do 54 mm od zdroje tepla. Termistory jsou do sebe vzdáleny 6 mm a délka topného pulzu je 60s. Graf č. 19 zobrazuje průběh teploty na zdroji tepla a nejbližších termistorech. Teplota byla měřena termistorem, který byl k SMD odporu přilepen teplovodivou pastou pro zajištění ideálního přestupu tepla. Teplota na SMD odporu nejprve narůstá lineárně, po dosažení teploty přibližně 60 °C se začíná nárůst teploty zpomalovat. Po ukončení 60s topného pulzu teplota prudce klesá.

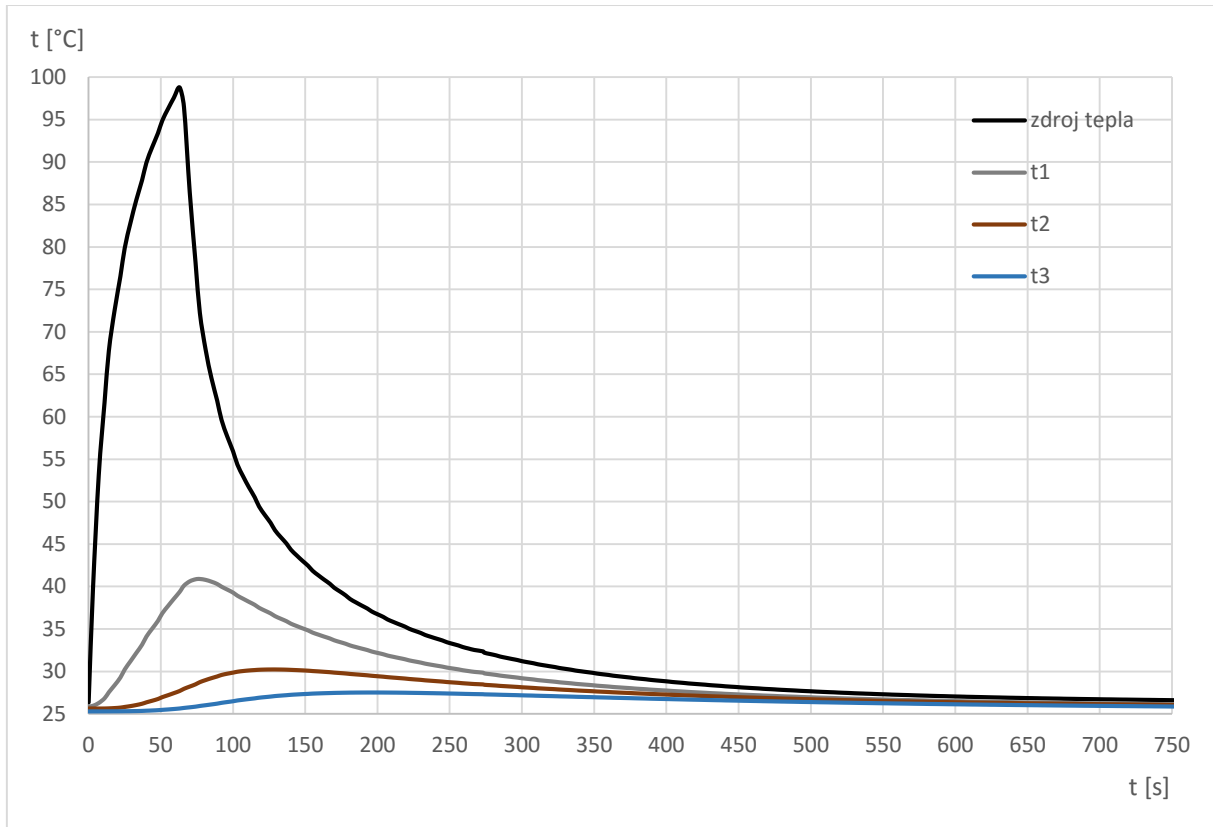
V grafu č. 20 je dobře viditelné, že s rostoucí vzdáleností téměř lineárně narůstá doba dosažení maxima teplotní vlny, což je v rozporu s teorií, která uvažuje s kvadratickým nárůstem. Příčina, proč dochází k lineárnímu nárůstu, není odhalena.

Z grafu č. 21 vidíme, že s rostoucí vzdáleností strmě klesá amplituda teplotní vlny. Pro vzdálenosti větší než 30 mm je teplotní vlna velmi malá a snadno ovlivnitelná parazitními vlivy a nepřesnostmi měření.

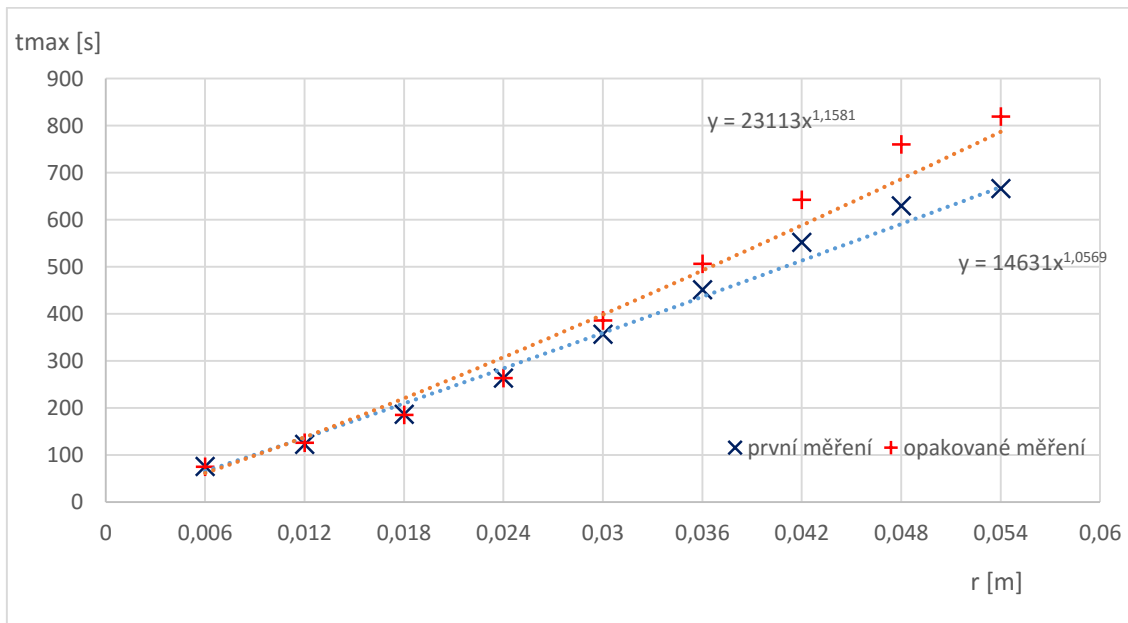
Graf č. 18 Průběh teploty v různé vzdálenosti od zdroje tepla, první měření, (termistory vzdáleny od sebe 6mm, t1 – nejbližší termistor, t9 - nejvzdálenější)



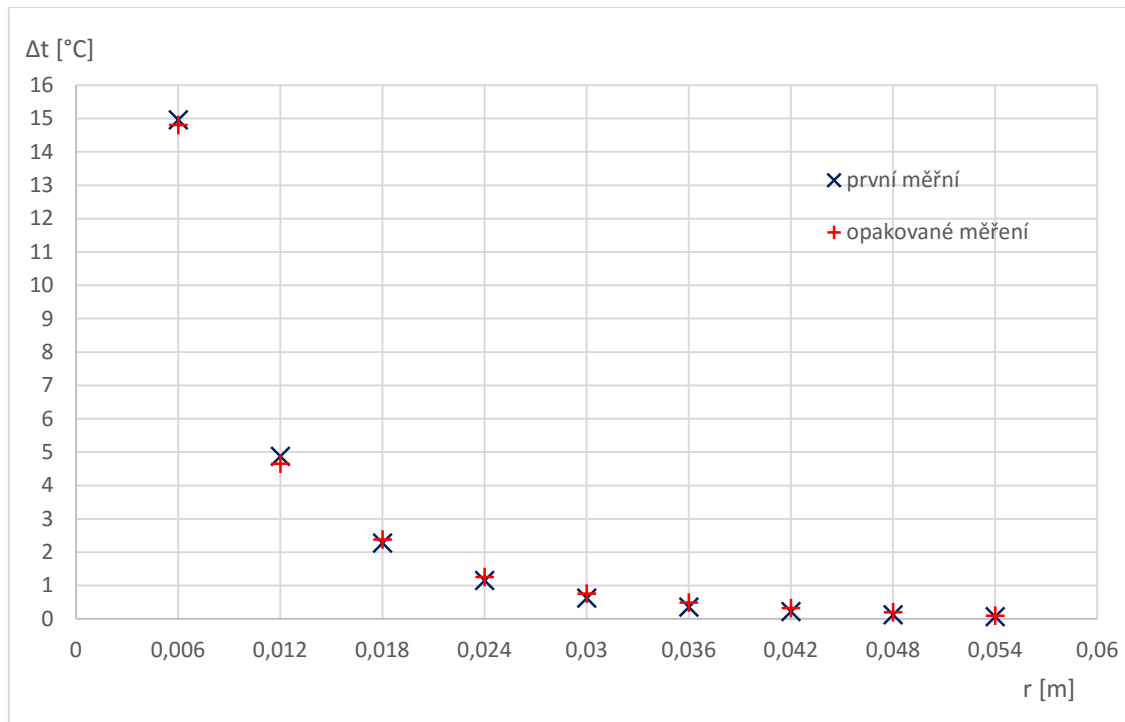
Graf č. 19 Průběh teploty na zdroji tepla a pro porovnání tři nejbližší termistory



Graf č. 20 Závislost doby dosažení teplotního maxima na vzdálenosti



Graf č. 21 Závislost nárůstu teploty na vzdálenosti



3.6.3 Experiment šíření tepla – vliv uspořádání přívodních vodičů na měření

Bylo provedeno měření se změněným uspořádáním přívodních vodičů. V původním uspořádání jsou všechny kabely vyvedeny stejným směrem, uloženy pod sebou v jednom sloupci. V tomto měření jsem uspořádání vodičů změnil tím způsobem, že každé vrstvě přívodní vodič vedl od středu ven jiným směrem. Směr vedení vodiče od středu ven se posouval přibližně o 45° po směru hodinových ručiček. Cílem tohoto uspořádání bylo rovnoměrně rozložit přívodní vodiče v rámci přípravku a tím omezit vliv odvodu tepla kabely. Další postup měření je stejný jako v kapitole 3.6.1.

podmínky měření:

datum měření: 20. 4. 2016

teplota: 25,1C

vlhkost: 31%

tlak: 1028 hPa

Tabulka č. 12 Doba dosažení teplotního maxima a nárůst teploty pro různé vzdálenosti od zdroje tepla po změně uspořádání vodičů, porovnání s prvním a druhým měřením

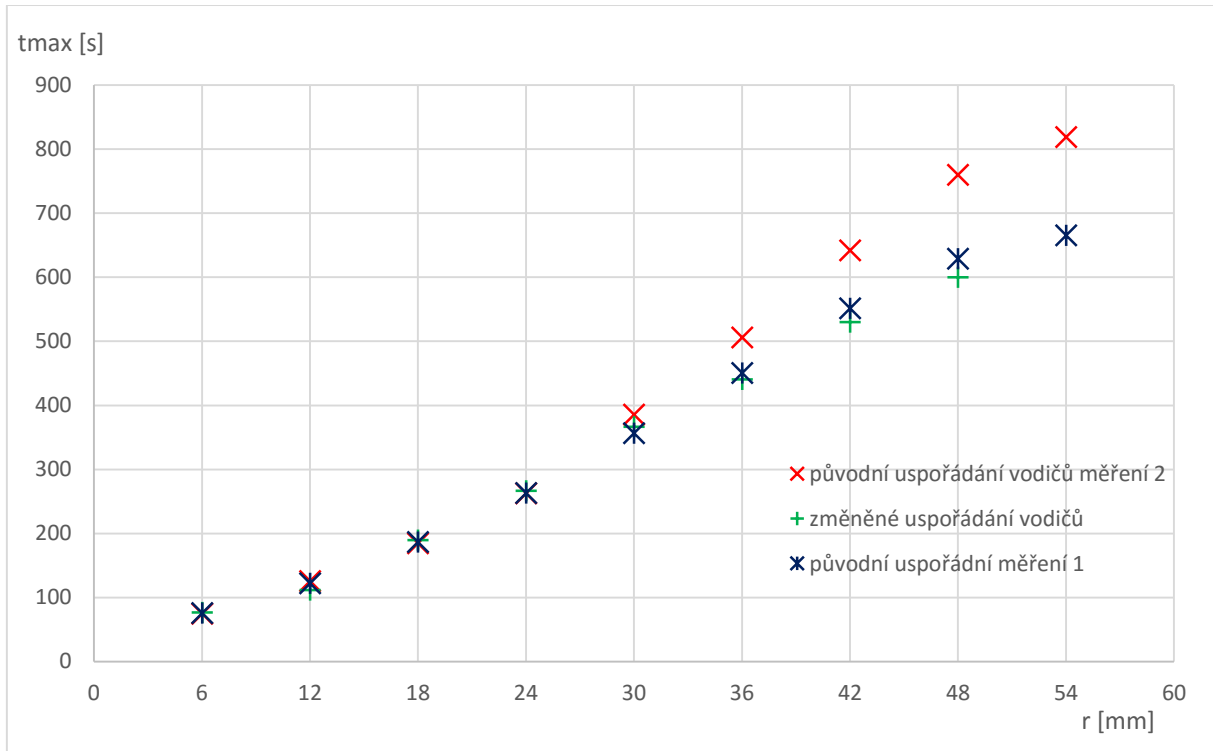
			vůči prvnímu měření		vůči druhému měření	
r [m]	t_{\max} [s]	θ [°C]	$\delta_{t_{\max}}$ [%]	δ_{θ} [%]	$\delta_{t_{\max}}$ [%]	δ_{θ} [%]
0,006	77	14,90	1,6	-0,3	2,7	0,7
0,012	112	4,990	-8,6	2,3	-11,1	7,1
0,018	190	1,930	1,8	-15,4	2,7	-18,9
0,024	267	1,050	1,4	-9,5	1,5	-16,7
0,030	367	0,500	2,9	-20,6	-4,9	-34,0
0,036	441	0,320	-2,2	-11,1	-12,8	-35,4
0,042	530	0,170	-3,9	-22,7	-17,4	-48,3
0,048	600	0,086	-4,6	-33,8	-21,1	-57,8

r	vzdálenost od zdroje tepla
t_{\max}	doba dosažení teplotního maxima, první měření
θ	nárůst teploty
$\delta_{t_{\max}}$	relativní chyba doby teplotního maxima
δ_{θ}	relativní chyba nárůstu teploty

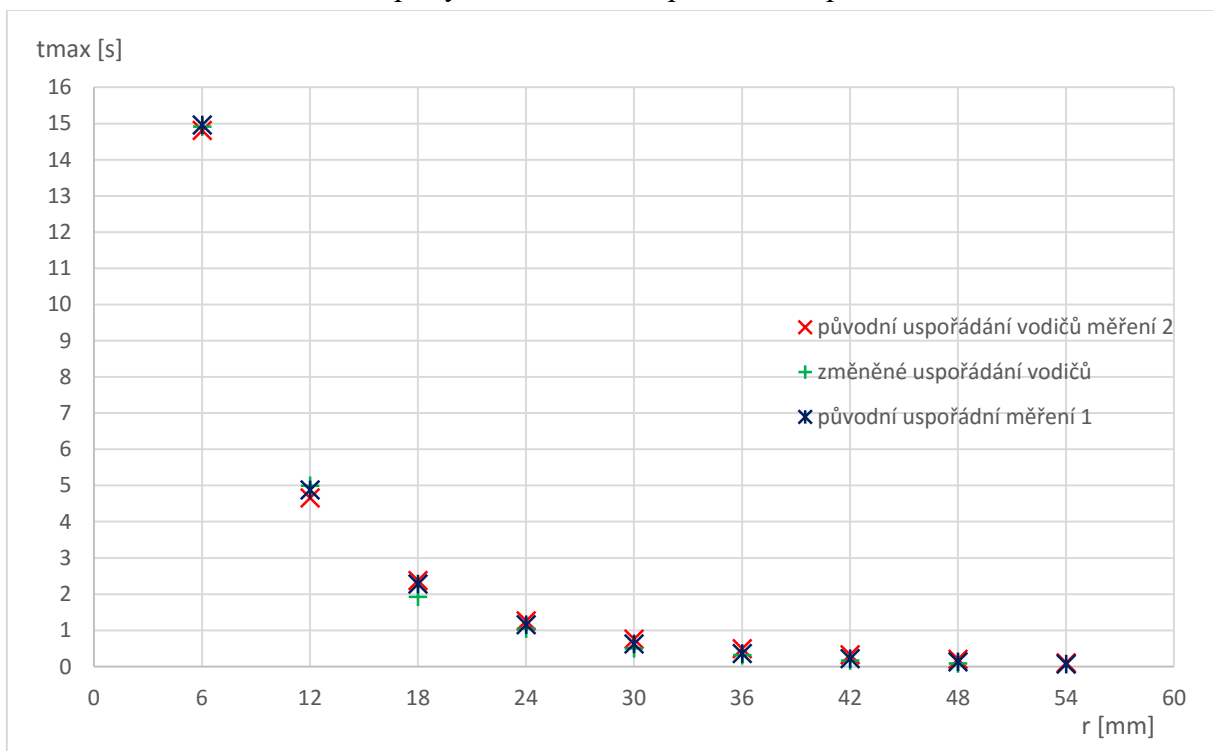
Z tabulky č. 12 vidíme, že změna uspořádání vodičů má větší vliv na nárůst teploty než na dobu dosažení teplotního maxima, která rozhodující pro výpočet tepelné vodivosti. S rostoucí vzdáleností se zvětšují rozdíly v amplitudě teplotní vlny. Ve větší vzdálenosti je amplituda teplotní vlny tak malá, že má na měření vliv přesnost přístroje, šum a přesnost samotného termistoru. Se změněným uspořádáním vodičů je amplituda teplotní vlny nižší než v původním uspořádání. Doba dosažení teplotního maxima je v porovnání s prvním měřením velmi podobná, v rozmezí od -8,6% do +2,9%. V porovnání s druhým měřením jsou rozdíly výraznější, přestože bylo druhé měření provedeno za stejných podmínek. Druhé měření bylo nejspíše ovlivněno chybou.

Z grafu č. 22 vidíme, že do vzdálenosti 24mm není rozdíl mezi jednotlivými měřeními příliš výrazný. Až od vzdálenosti 30mm se doby teplotních maxima začínají lišit. Je patrné, že doba dosažení teplotního maxima nenarůstá kvadraticky, ale spíše lineárně se zvětšující vzdáleností od zdroje tepla. V grafu č. 23 jsou zobrazeny amplitudy teplotní vlny v různých vzdálenostech. Pro větší vzdálenosti od zdroje tepla je amplituda teplotní vlny velmi malá a proto teplotní vlna těžce rozlišitelná.

Graf č. 22 Závislost doby dosažení teplotního maxima na vzdálenosti



Graf č. 23 Závislost nárůstu teploty na vzdálenosti, porovnání s předchozími měřeními



4 Závěr

Cílem této práce je ověřit na přípravku nestacionární metodu měření tepelné vodivosti s bodovým zdrojem tepla. Metoda funguje na principu měření doby, než teplotní vlna ze zdroje tepla dosáhne maxima v definované vzdálenosti, kde je umístěn senzor a následným vypočtením tepelné vodivosti z naměřených dat. Měření byla provedena na přípravku z polystyrenu EPS 100S se zdrojem tepla ve formě SMD odporu a termistorem jako snímačem. Část měření byla provedena na vzorku pórobetonu Ytong, který byl použit v dřívější bakalářské práci. Další část měření byla provedena na přípravku z polystyrenu STARLON.

První měření se zabývají vlivem délky pulzu na měření. Nejvhodnější korekci pro konečnou délku pulzu se ukázala korekce dle vztahu č. 13. Tato korekce funguje dobře pro různé délky pulzu v rozmezí od 10s do 60s.

Dalším ověřovaným vlivem je vzdálenost termistoru od zdroje tepla. Zde se objevil výrazný problém. S narůstající vzdáleností roste hodnota tepelné vodivosti vypočtené z naměřených hodnot. Tento jev se objevil jak na vzorku s polystyrenem, tak i na vzorku s pórobetonem Ytong. Důvod narůstající tepelné vodivosti je, že dle teorie s narůstající vzdáleností kvadraticky narůstá doba dosažení teplotního maxima, ale měření ukázala lineární nárůst doby teplotního maxima.

Vliv rozmístění přívodních vodičů k termistorům a zdroji tepla se ukázal jako výrazný, proto je vhodné volit vodiče s co nejmenším průřezem. Tím zmenšíme odvod tepla měděným jádrem kabelu a menší rozměry méně deformují měřený materiál při použití zapichovací sondy.

Vliv kontaktu termistoru a zdroje tepla s polystyrenem se ukázal jako výrazný. Nanesením teplovodivé pasty a úpravou vzorku polystyrenu došlo k snížení naměřené tepelné vodivosti o 30%. Tento rozdíl je opačný, než bylo předpokládáno. Odstraněním vzduchové mezery a zlepšením kontaktu s polystyrenem se měla tepelná vodivost zvětšit, protože polystyren má větší tepelnou vodivost než vzduch.

Případným dalším rozšířením bakalářské práce by mohlo být proměření vlivu teploty a vlhkosti na výsledky měření.

5 Literatura

- [1] KREMPASKÝ, Július. *Meranie termofyzikálnych veličín*. 1. vyd. Bratislava: SAV, 1969, 287 s. ISBN -.
- [2] KREJČÍ, J. *Měření tepelné vodivosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [3] ĎAĎO a KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9
- [4] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J.- *Fyzika, Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*
- [5] BACHL s.r.o., *Technický list pěnový polystyren EPS 100 S Stabil*, 2008, Dostupné z: http://registrace.zelenausporam.cz/gallery/11772-bachl_technicky_list_eps_100_s.pdf
- [6] THE ENGINEERING TOOLBOX, *Thermal Conductivity of materials and gases*, Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [7] VISHAY, *NTC Thermistor NTCLE305E4SB datasheet*, Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/652596.pdf>
- [8] SAZIMA M. *Sdílení tepla*, SNTL - Nakladatelství technické literatury 1978
- [9] KUNA L. *Tepelné izolácie a meranie tepelných strát* SNTL Praha 1963
- [10] AKHBARI M., SINTON D., BAHRAMI M., *Moving heat sources in a half space: effect of source geometry*
- [11] CARSLAW, H.S., JEAGER, J.C., 1959, *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press
- [12] MIREL a.s., *Technický list STARLON tl. 3mm*, Dostupné z: <http://www.mirelon.com/c3/docs/starlon-3-mm-d00000103.pdf>

6 Seznam symbolů, obrázků a grafů

6.1 Seznam symbolů

q	vektor hustoty tepelného toku	$[W*m^{-2}]$
λ	tepelná vodivost	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
λ_s	tepelná vodivost ideálně suchého materiálu	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
λ_o	tepelná vodivost při 0°C	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
u_0	objemová vlhkost, poměr objemu vlhkosti k celkovému objemu materiálu	$[-]$
T	teplota	$[K]$
T_0	počáteční teplota	$[K]$
θ	nárůst teploty	$[K]$
c	měrná tepelná kapacita	$[J*kg^{-1}*K^{-1}]$
ρ	hustota	$[kg*m^{-3}]$
k	teplotní vodivost	$[W*J^{-1}*m^{-2}]$
q_0	výkon	$[W]$
q_{bod}	výkon bodového zdroje tepla	$[W]$
Q	teplo dodané bodovým zdrojem tepla	$[J]$
r	vzdálenost čidla od zdroje	$[m]$
U	rychlost pohybu zdroje tepla	$[m/s]$
X	vzdálenost kterou v čase t překoná zdroj tepla	$[m]$
τ	doba po kterou se zdroj tepla pohybuje	$[s]$
t_m	doba dosažení teplotního maxima	$[s]$
Δt	doba topného pulzu	$[s]$

6.2 Seznam tabulek

tabulka 1	změna tepelné vodivosti s vlhkostí	12
tabulka 2	přírůstek tepelné vodivosti s rostoucí vlhkostí	12
tabulka 3	hodnoty odporu termistorů pro vybrané teploty	20
tabulka 4	závislost tepelné vodivosti na délce pulzu, vzorek pórobeton	26
tabulka 5	závislost tepelné vodivosti na vzdálenosti od zdroje tepla, vzorek pórobeton	27
tabulka 6	závislost tepelné vodivosti na délce pulzu, vzorek polystyren, měření 1	29
tabulka 7	závislost tepelné vodivosti na délce pulzu, vzorek polystyren, měření 2	30
tabulka 8	závislost tepelné vodivosti na vzdálenosti od zdroje tepla, vzorek polystyren	33
tabulka 9	tepelná vodivost po zlepšení přestupu tepla	36
tabulka 10	tepelná vodivost po změně uspořádání přívodních vodičů	39
tabulka 11	Doba dosažení teplotního maxima v závislosti na vzdálenosti	44
tabulka 12	Doba dosažení teplotního maxima v závislosti na vzdálenosti, změněné uspořádání vodičů	47

6.3 Seznam obrázků

Obrázek 1	charakteristika tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů v závislosti na teplotě	13
Obrázek 2	teplotní charakteristika platinového senzoru	14
Obrázek 3	závislost odporu monokrystalického senzoru na teplotě	15
Obrázek 4	závislost odporu termistoru na teplotě	17
Obrázek 5	teplotní charakteristika různých druhů termočlánků	19
Obrázek 6	Standartní uspořádání přípravku	24
Obrázek 7	Alternativní uspořádání přípravku	24
Obrázek 8	Umístění termistoru na vrstvě polystyrenu	43
Obrázek 9	Boční pohled na přípravek, přívodní vodiče pod sebou	43

6.4 Seznam grafů

Graf 1	Průběh odporu termistoru během proměření v kalibrační pícce	21
Graf 2	Závislost odporu termistoru č. 1 na teplotě	22
Graf 3	Tepelná vodivost pórobetonu pro různé vzdálenosti snímače od zdroje tepla	28
Graf 4	průběhy teplot v různých vzdálenostech od zdroje tepla, pórobeton	28
Graf 5	Tepelná vodivost polystyrenu pro různé délky topného pulzu, měření 1	31
Graf 6	Tepelná vodivost polystyrenu pro různé délky topného pulzu, měření 2	31
Graf 7	Průběhy teplot v různých vzdálenostech od zdroje tepla, vzorek polystyren, měření 1	32
Graf 8	Průběhy teplot v různých vzdálenostech od zdroje tepla, vzorek polystyren, měření 2	32
Graf 9	Tepelná vodivost polystyrenu pro různé vzdálenosti termistoru od zdroje tepla	34
Graf 10	Průběh teploty pro různé vzdálenosti od zdroje tepla., měření1	35
Graf 11	Průběh teploty pro různé vzdálenosti od zdroje tepla., měření2	35
Graf 12	Porovnání naměřené tepelné vodivosti před a po úpravě vzorku	37
Graf 13	Průběh teploty před a po úpravě vzorku, puls 10s	38
Graf 14	Průběh teploty před a po úpravě vzorku, puls 30s	38
Graf 15	Vliv uspořádání vodičů, termistorů a zdroje tepla na naměřené hodnoty tepelné vodivosti	40
Graf 16	Průběh teploty s prvním a druhým uspořádáním vodičů, puls 10s	40
Graf 17	Průběh teploty s prvním a druhým uspořádáním vodičů, puls 30s	41
Graf 18	Průběh teploty pro různé vzdálenosti od zdroje tepla, první měření	45
Graf 19	Průběh teploty na zdroje tepla a nejbližší tři termistory	46
Graf 20	Závislost doby dosažení teplotního maxima na vzdálenosti	46
Graf 21	Závislost nárůstu teploty na vzdálenosti	47
Graf 22	Závislost doby dosažení teplotního maxima na vzdálenosti	48
Graf 23	Závislost nárůstu teploty na vzdálenosti,	48

6.5 Seznam příloh na CD

Kompletní text bakalářské práce ve formátu .pdf