TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

LABORATORNÍ MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI LÁTEK

Bakalářská práce

Studijní program:	B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor:	2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce:	**Martin Simet**
Vedoucí práce:	doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2014

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

Bachelor thesis

Study programme:	B2301 – Mechanical Engineering
Study branch:	2301R000 – Mechanical Engineering
Author:	**Martin Simet**
Supervisor:	doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

Studijní rok 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Martin S I M E T**

Studijní program **B 2301 Strojní inženýrství**

Obor -

Zaměření -

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Laboratorní měření tepelné vodivosti látek

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proveďte rešerši literatury o principech měření tepelné vodivosti. Popište zákony popisující vedení tepla v látkách, uveďte vztahy pro tepelnou a teplotní vodivost.
2. Popište přístroj C-Therm, vytvořte stručný návod na měření. Proveďte na přístroji měření dodaných vzorků.
3. Popište přístroj Lambda HFM 436/1E, vytvořte stručný návod na měření. Proveďte na přístroji měření dodaných vzorků.
4. Měření zpracujte (vypočítejte střední hodnoty, odchylku a další). U vhodných vzorků porovnejte výsledky získané z obou přístrojů.
5. V závěru porovnejte vhodnost obou přístrojů, jejich výhody, nevýhody a formulujte závěry z měření.

Forma zpracování bakalářské práce:

- původní zpráva: cca 30 stran

- grafické práce: - - -

Seznam odborné doporučené literatury:

[1]C-Therm, manuál k přístroji, C-Therm technologies.

[2]Lambda HFM 436/1E, manuál k přístroji, Netzsch.

[3]J. Chyský, K. Hemzal a kol., Větrání a klimatizace, Technický průvodce, ročník XLVIII, 1993.

[4]V. Dvořák, J. Šulc, J. Urbášek, Technická měření – návody na cvičení, 2005.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Václa Dvořák, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

L. S.

doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 19. 11. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 9. 7. 2014

Podpis:

Anotace

Bakalářská práce se zabývá měřením tepelné, teplotní vodivosti a popisem měření různými metodami. Metody jsou rozděleny na stacionární, absolutní, relativní a nestacionární.

Praktická část je věnována měřícím přístrojům C-Therm a Lambda HFM 436/1E, provedení vlastního měření a vyhodnocení výsledků. V příloze jsou vytvořeny návody na měření pro tyto přístroje.

Klíčová slova

Tepelná vodivost, teplotní vodivost, stacionární měření, nestacionární měření.

Annotation

This bachelor thesis is focused on measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and description of measurements principles by different methods. This methods are dividend into stationary, absolute, relative and non-stationary.

The practical part is devoted of measuring instruments C-Therm and Lambda HFM 436/1E, realization of measurement itself and final validation of results. The appendixs are created on measurement instruction for these devices.

Keywords

Thermal conductivity, thermal diffusivity, stationary measurement, non-stationary measurement.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D. za řádnou pedagogickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval rodině za jejich podporu a trpělivost.

V Liberci dne 9. Července 2014 ....

Obsah

1. Úvod ... 10

Teoretická část ... 11

2. Mechanismy přenosu tepla ... 11

2.1. Přenos tepla vedením (kondukcí) ... 11

2.1.1. Stacionární vedení tepla ... 11

2.1.2. Nestacionární vedení tepla ... 12

2.2. Přenos tepla prouděním (konvekcí) ... 13

2.3. Přenos tepla zářením (sáláním) ... 14

3. Tepelné vlastnosti ... 15

3.1. Tepelná vodivost ... 15

3.2. Měrná tepelná kapacita ... 15

3.3. Teplotní vodivost ... 15

4. Měření tepelné vodivosti ... 16

4.1. Stacionární metody ... 16

4.1.1. Absolutní metody ... 16

4.1.1.1. Metoda desky ... 16

4.1.1.2. Metoda válce ... 17

4.1.1.3. Metoda koule ... 18

4.1.1.4. Metoda elipsoidu ... 19

4.1.2. Relativní metody ... 20

4.1.2.1. Metoda desky ... 20

4.1.2.2. Metoda tyčí ... 22

4.1.2.3. Metoda válců ... 23

4.1.2.4. Metoda koulí ... 23

4.2. Nestacionární metody měření ... 24

4.2.1. Nestacionární metoda horkého drátu ... 24

Praktická část ... 26

5. Cíl měření ... 26

5.1. Měření na přístroji C-Therm ... 26

5.1.1. Popis přístroje C-Therm ... 26

5.1.2. Měření ... 27
5.2. Měření na přístroji Lambda HFM436/1E ... 31
5.2.1. Popis přístroje Lambda HFM436/1E ... 31
5.2.2. Měření ... 32
6. Závěr ... 33

1. Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o měření tepelné vodivosti v laboratorním prostředí na přístrojích, které budou v této práci dále popsány.

Teoretická část obsahuje několik kapitol. V první části jsou popsány mechanismy přenosu tepla a jejich matematický popis. Po seznámení se s přenosem tepelné energie v hmotě je další část věnována popisu hlavních tepelných parametrů. Následuje popis měření tepelné vodivosti látek různými metodami, kterých existuje velké množství. Prostor je věnován několika metodám stacionárního a nestacionárního měření tepelné vodivosti.

Na začátku praktické části je popis přístroje C-Therm a dále zpracované výsledky z měření na přístroji C-Therm.

Součástí praktické části je také popis přístroje Lambda HFM 436/1E a zpracované výsledky vlastního měření. Součástí práce bylo vytvoření stručných návodů na měření tepelné vodivosti pro tyto přístroje. Tyto návody jsou v příloze.

V závěru jsou uvedeny některé klady a zápory přístrojů, na kterých měření proběhlo. Součástí závěru je také zhodnocení měření.

Teoretická část

2. Mechanismy přenosu tepla

Přenos tepla (transport tepla, šíření tepla) probíhá třemi možnými mechanismy: přenos tepla vedením (kondukcí), přenos tepla prouděním (konvekcí) a přenos tepla zářením (sáláním).

2.1. Přenos tepla vedením (kondukcí)

Kondukce tepla je způsob šíření tepla v pevných tělesech, jejichž různé části mají různou teplotu. Částice látky s vyšší kinetickou energií předávají část své pohybové energie částicím s nižší kinetickou energií prostřednictvím vzájemných srážek. Částice hmoty se při tom nepohybují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Teplo se vedením také šíří v kapalinách a plynech, kde ve větší míře probíhá vedení tepla prouděním. [5]

Vedení tepla lze sledovat v teplotním stavu:

- Ustáleném (stacionárním) – teplota se v určitém místě s časem nemění
- Neustáleném (nestacionárním) – teplota se v určitém místě mění s časem

2.1.1. Stacionární vedení tepla

Nemá-li těleso ve všech místech stejnou teplotu, dochází k jejímu vyrovnání důsledkem předávání kinetické energie jeho částic. Toto vyrovnání teplot v tělese vzájemným působením částic se nazývá vedení tepla.

Vedení tepla popisuje Fourierův zákon vedení tepla:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \qquad [\ W \cdot m^{-2}\ ] \qquad (1.1.1)$$

Veličina $\dot{q}$ vyjadřuje v rovnici množství tepla v joulech [J], které proteklo jednotkou plochy, kolmou na směr proudění za jednotku času

a nazývá se hustota tepelného toku. Poměr dT/dx se nazývá teplotní gradient, který označuje poměr přírůstku teploty dT ke vzdálenosti mezi izotermními plochami (geometrické místo bodů o stejné teplotě) ve směru rovnováhy.

$$grad\ T = \frac{dT}{dx} \quad [K \cdot m^{-1}] \qquad (1.1.2)$$

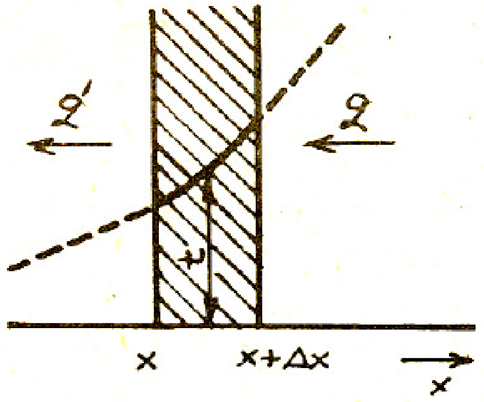
Teplotní gradient (teplotní růst) je změna teploty v daném místě. Ve směru poklesu teploty t se teplotní gradient označuje znaménkem mínus a nazývá se teplotní spád (-dt/dx). Záporné znaménko v rovnici (1.1.1) znamená, že tepelný tok proudí proti směru teplotního gradientu. Množství tepla, které projde za časovou jednotku je dáno vztahem:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A = \lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \quad [W] \qquad (1.1.3)$$

kde A [m^2] je plocha. [7]

2.1.2. Nestacionární vedení tepla

U neustáleného vedení tepla dochází ke změně teploty v jednotlivých částech tělesa. Uvažujme případ vedení tepla deskou, které nastane při náhlém zvýšení teploty na jednom z povrchů desky. Desku rozdělíme na vrstvy o tloušťce Δx [m]. Hodnota tepelného toku není ve všech vrstvách stejná jako při ustáleném vedení tepla. To je důsledkem toho, že část tepla, které do vrstvy vstoupí se spotřebuje na ohřátí. O tuto část tepla je pak tok v další vrstvě nižší.



Obr. 1 Průběh teploty při nestacionárním vedení tepla. [4]

2.2. Přenos tepla prouděním (konvekcí)

Přenos tepla prouděním je druhým způsobem přenosu, kdy dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Probíhá však pouze v kapalinách a plynech. Ohřátá kapalina nebo plyn může proudit samovolně nebo nuceně a tak teplo přenášet. Samovolné proudění teplejších částí tekutého systému obvykle stoupá vzhůru, protože hustota kapalin a plynů s rostoucí teplotou zpravidla klesá. Vznikne-li mezi místem ohřevu a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, ohřívaná a tedy lehčí část tekutiny stoupá a zároveň je ochlazená těžší část vytlačována. Vytlačená chladnější část se dostane na místo ohřevu a celý proces se opakuje. Tím vzniká v tekutině proudění, které se využívá k přenosu tepla např. v ústředním topení. Ve srovnání s vedením tepla může být šíření tepla prouděním rychlejší. [3]

Nucené proudění je vyvoláno dodávkou mechanické energie tekutině (plynu) míchadlem, čerpadlem (ventilátorem). Nucené proudění je využito tam, kde je nutné přestup tepla zintenzivnit. [12]

2.3. Přenos tepla zářením (sáláním)

Přenos tepla zářením jako třetí způsob přenosu tepla nevyžaduje látkové prostředí. V tomto případě se teplo přenáší elektromagnetickým zářením, i když prostor, v němž přenos probíhá, není vyplněn látkou. Probíhá i ve vakuu. Tak se teplo dostává např. ze Slunce na Zemi. Přenos tepla zářením se též využívá k vytápění prostorů. [3]

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

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \; [W] \tag{1.3.1}$$

kde $\sigma = 5{,}6703 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ je Stefan-Boltzmannova konstanta, *ε* je symbol pro emisivitu povrchu předmětu a nabývá hodnot <0-1> podle složení a provedení povrchu. Předmět s největší emisivitou rovnou 1,0 se nazývá černý zářič neboli černé těleso. Výkon, s jakým předmět absorbuje energii tepelného záření z jiného zdroje (o teplotě T_0 v kelvinech), je:

$$P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T_0^4 \; [W] \tag{1.3.2}$$

Předmět teploty *T* vyzařuje energii do svého okolí a současně energii z okolí přijímá. Neuvažujeme-li přínos záření odraženého, je úhrnný výkon dodaný teleným zářením roven:

$$P_\Sigma = P_a - P_T = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_0^4 - T^4) \; [W] \tag{1.3.3}$$

[3]

3. Tepelné vlastnosti

3.1. Tepelná vodivost

Vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Číselně to vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu projde vrstvou o tloušťce 1m a plochou 1m^2 při rozdílu teplot 1K na obou stranách vrstvy. Závisí na struktuře hmoty, její hustotě, vlhkosti, tlaku a teplotě. Značí se malým řeckým písmenem λ a její jednotkou je $\left(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}\right)$. Podle tohoto součinitele se látky dělí na tepelné vodiče - látky s vysokou rychlostí vedení tepla a velkým součinitelem tepelné vodivosti a tepelné izolanty - látky s nízkou rychlostí vedení tepla a malým součinitelem tepelné vodivosti. [2]

Tepelná vodivost je definována Fourierovým zákonem viz (1.1.1).

3.2. Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita nebo také měrné teplo je teplo, které je třeba dodat 1 kg hmotnosti, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K. Měrná tepelná kapacita se značí malým písmenem *c,* její rozměr je $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$. [2]

3.3. Teplotní vodivost

Vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné vodivosti a součinu její objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity za stálého tlaku.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \ , \qquad (2.3.1)$$

kde λ je tepelná vodivost $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$, ρ je objemová hmotnost $[kg \cdot m^{-3}]$ a *c* je měrná tepelná kapacita $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$. [4]

4. Měření tepelné vodivosti

4.1. Stacionární metody

Stacionární metody měření tepelných veličin patří mezi klasické metody, které se používají poměrně dlouho a jsou jednoduché. Mezi výhody stacionárního měření patří přesnost změřených hodnot a tepelného příkonu, protože měřené veličiny mají ustálené hodnoty. [1]

4.1.1. Absolutní metody

Absolutní metody vycházejí přímo z Fourierova zákona pro tepelnou vodivosti. Na určení tepelné vodivosti je potřebné znát hustotu tepelného toku a teplotní gradient. Podle tvaru vzorku se postupně vyvinuly metody destičky, koule, válce a elipsoidu. Vztahy na určení tepelné vodivosti vyplívají z teplotních funkcí pro každý tvar daného vzorku. [1]

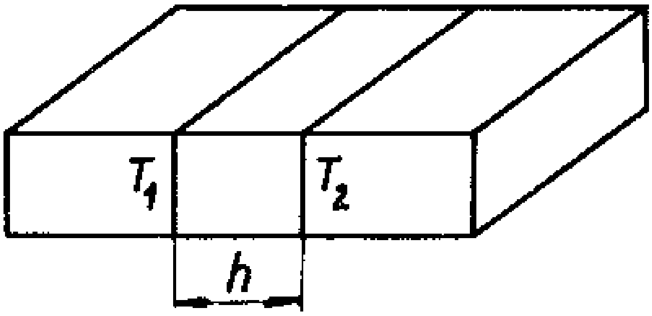
4.1.1.1. Metoda desky

Vzorek má tvar planparalelní destičky, která se umístí mezi dvě prostředí. Jedno prostředí má funkci ohřívače a druhé má funkci chladiče. Jako ohřívač se používá dobře vodivá látka, ve které je zabudované elektrické vyhřívací zařízení. Jako chladič se také použije dobře vodivá látka, která nebude mít zabudované vyhřívací zařízení, nebo lze použít prostředí se stálou teplotou (např. směs vody a ledu). V ustáleném stavu se změří teplota t_1 *[K]* ohřívače, teplota t_2 *[K]* chladiče a tepelný tok $\dot{q}_s$ $[W]$. Tepelná vodivost se poté určí ze vztahu:

$$\lambda = \frac{\dot{q}_s \cdot h}{S(T_2 - T_1)} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \;, \qquad (3.1.1)$$

kde h je tloušťka vzorku a S je teplosměnná plocha vzorku. Vztah je platný v případě, že tepelný tok má směr pouze v ose vzorku, tj. nedochází k odvodu (zisku) tepla z boků vzorku.

Touto metodou lze dosáhnout dobrých výsledků u vzorků s velkou tepelnou vodivostí (kovy). Pro měření ostatních látek je potřebné použít systém pomocných ohřívačů a izolačních hmot, aby se tepelné ztráty snížily na minimum. Problém vzniká při měření látek s malou tepelnou vodivostí. Část tepla uniká ze zdroje na opačnou stranu navzdory použití izolačních materiálů a zatěžuje měření systematickou chybou. Tento problém lze vyřešit použitím dvou stejných vzorků testované látky, mezi které se umístí ohřívací zařízení. [1]



Obr. 2 Schéma uspořádání planparalelní destičky pro měření tepelné vodivosti stacionární metodou. [1]

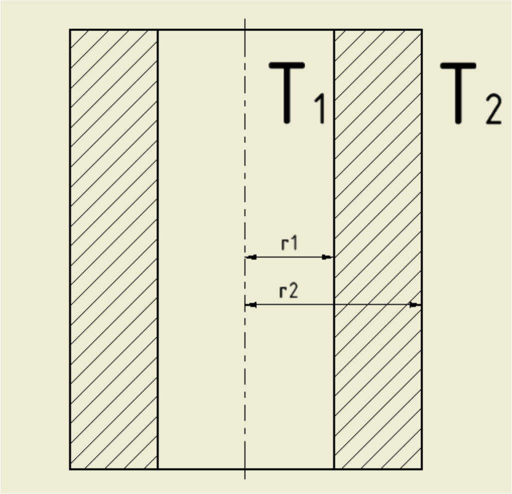
4.1.1.2. Metoda válce

Vzorek má tvar dutého válce, jehož výška je několikanásobně větší než jeho průměr. Uvnitř vzorku je umístěný tepelný zdroj (elektrická spirála). Zvnějšku je vzorek obalený tepelně izolačním materiálem. [1]

Tepelná vodivost se poté určí ze vztahu:

$$\lambda = \frac{\dot{q}_s}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_2 - T_1)} \cdot \ln \cdot \frac{r_1}{r_2} \qquad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \qquad (3.1.2)$$

Tento vztah je platný v případě, že z boků vzorku neuniká teplo a tepelný tok má složku pouze v radiálním směru.



Obr. 3 Vzorek tvaru dutého válce pro měření tepelné vodivosti. [1]

4.1.1.3. Metoda koule

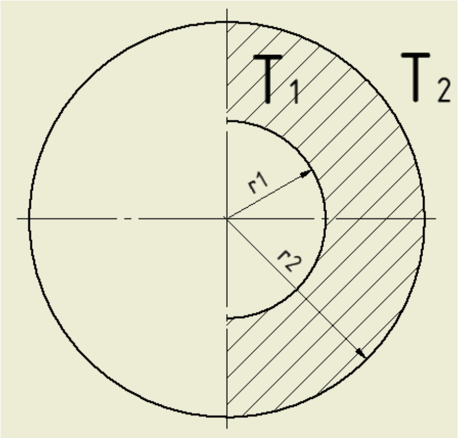
Vzorek má tvar duté koule, která uvnitř obsahuje symetricky rozložený tepelný zdroj a z vnějšku tepelně izolační látku. Po dosažení ustáleného stavu se změří teploty vnitřních a vnějších ploch vzorku a výkon zdroje.

Tepelná vodivost se poté určí ze vztahu:

$$\lambda = \frac{\dot{q}_s}{2\pi(T_1 - T_2)}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \tag{3.1.3}$$

V tomto případě se nevyskytují problémy s tepelnými ztrátami ze zdroje. Měření můžou být zkreslena nerovnoměrným rozložením tepelného toku. Tepelné ztráty vznikají v otvorech pro termočlánky a nedokonalou tepelnou izolací a odvodu samotnými termočlánky.

Tato metoda, i přes velmi dobré výsledky, se prakticky používá jen pro kapalné a sypké látky, protože příprava vzorků z tuhých látek je velmi náročná. [1]



Obr. 4 Vzorek ve tvaru duté koule pro měření tepelné vodivosti. [1]

4.1.1.4. Metoda elipsoidu

Měřený vzorek má tvar tělesa omezeného dvěma elipsoidními plochami se společnými ohnisky. Ve vnitřním elipsoidu je umístěný tepelný zdroj, který musí být konstruovaný tak, aby se z každého přibližně rovného úseku v hlavní ose generovalo stejné množství tepla. Teplo se indikuje ve dvou místech ležících ve směru malé poloosy.

Tepelná vodivost se vypočítá ze vztahu:

$$\lambda = \frac{\dot{q}_s}{8\pi a \cdot (T_2 - T_1)} \ln \frac{(a^2 + R_2^2)^{1/2} + a}{(a^2 + R_2^2)^{1/2} - a} \cdot \frac{(a^2 + R_1^2)^{1/2} + a}{(a^2 + R_1^2)^{1/2} - a} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \qquad (3.1.4)$$

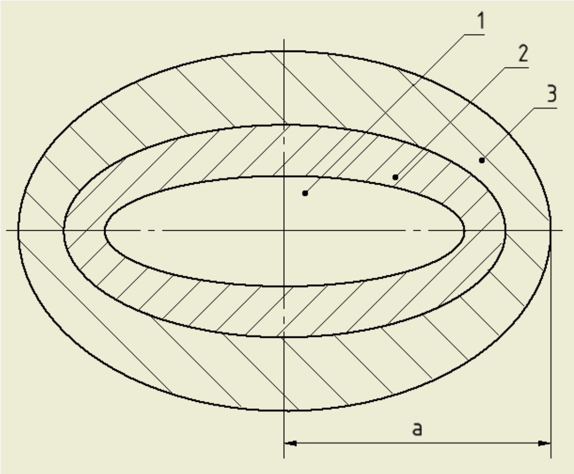
Význam veličin je zřejmý z obr. 4.

Tato metoda nemá žádné uplatnění při běžných měřeních vzhledem k těžkostem, které souvisí s přípravou vzorků. Používá se jen při měření tepelné vodivosti při vysokých teplotách (nad 1000°C). [1]

Teplotní rozdíl ve dvou bodech umístěných na malé poloose ve vzdálenosti R_1 respektive R_2 je dán vztahem:

$$T_2 - T_1 = \frac{\dot{q}_s}{8\pi a\lambda} \cdot \ln \frac{(a^2 + R_2^2)^{1/2} + a}{(a^2 + R_2^2)^{1/2} - a} \cdot \frac{(a^2 + R_1^2)^{1/2} - a}{(a^2 + R_1^2)^{1/2} + a} \quad , \qquad (3.1.5)$$

kde a značí velkou poloosu vnitřního elipsoidu.



Obr. 5 Schéma uspořádání pro měření tepelné vodivosti.

1 - ohřívač, 2 - vzorek, 3 - izolace [1]

4.1.2. Relativní metody

Relativní metody se od absolutních metod odlišují tím, že nepohodlné a často nepřesné měření tepelného toku se nahrazuje použitím normálu tj. vzorku se známou tepelnou vodivostí. Cílem relativních metod je zjednodušení měření. Ve skutečnosti vzniká celá řada nových problémů, které souvisí hlavně s vytvořením dokonalých tepelných kontaktů mezi vzorkem a normálou, s měřením teplot na více místech atd. Při měření pomocí relativních metod se v podstatě používají stejné tvary vzorků jako při měření absolutními metodami, jako destičky, válce, koule, elipsoidy a tyče. [1]

4.1.2.1. Metoda desky

Vzorek měřené látky je s normálou vložen mezi dva bloky, z nichž je jeden vyhřívaný. V ustáleném stavu a při zanedbání odvodu tepla z povrchu vzorku a normály prochází vzorkem a normálou stejné množství tepla, tj.

$$\lambda_0 \cdot S_0 \frac{\Delta T_0}{h_0} = \lambda \cdot S \frac{\Delta T}{h_1} \qquad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \qquad (3.1.6)$$

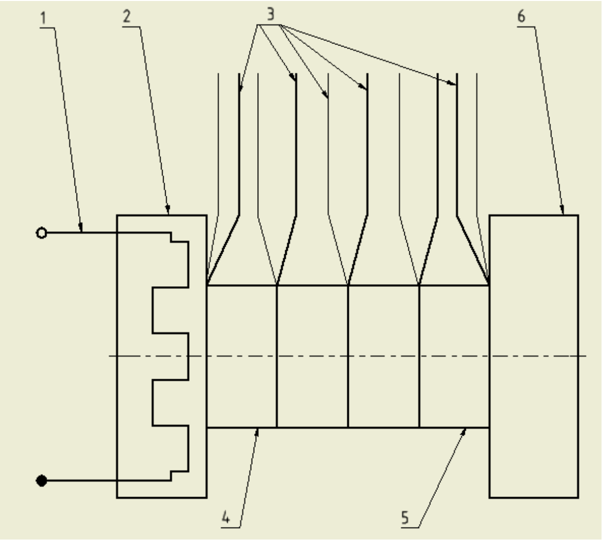
Z této rovnice lze odvodit vztah pro tepelnou vodivost:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{S_0 \cdot h_1 \cdot \Delta T_0}{S \cdot h_0 \cdot \Delta T} \qquad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
(3.1.7)

Při použití stejného průřez vzorku a normály se výše uvedený vztah zjednoduší:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{h_1 \cdot \Delta T_0}{h_0 \cdot \Delta T} \qquad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
(3.1.8)

Tím současně dosáhneme homogenního tepelného toku. Nejdokonalejší úpravou této metody je Stuckesovo – Chasmovo uspořádání.



Obr. 6 Schéma uspořádání pro Stuckese-Chasmarova relativní měření tepelné vodivosti.

1 - vyhřívání, 2 - teplejší blok, 3 - termočlánky, 4 - vzorek, 5 - normál,
6 - chladnější blok [1]

Tato metoda, která je velmi náročná na přípravu normálu, vzorku a systému pomocných ohřívačů, umožňuje měřit s přesností 1%. [1]

4.1.2.2. Metoda tyčí

Pro měření touto metodou je možné použít normál a vzorek ve tvaru tyčí. V porovnání s ostatními metodami je třeba počítat s odvodem tepla z povrchu, proto je pro výpočet potřeba znát koeficient odvodu tepla.

$$\lambda \cdot \beta_0 \cdot x_0^2 = \lambda_0 \cdot \beta \cdot x^2 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]. \qquad (3.1.9)$$

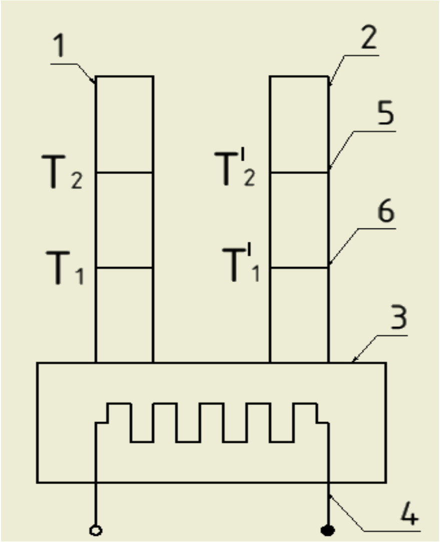
Z této rovnice vyplývá vztah pro tepelnou vodivost měřeného vzorku:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\beta}{\beta_0} \cdot \frac{x^2}{x_0} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \qquad (3.1.10)$$

Pokud se zabezpečí stejné podmínky pro odvod tepla z povrchu vzorku i normály, budou $\beta = \beta_0$. Vztah se poté zjednoduší a výsledný vztah pak bude:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{x^2}{x_0} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

[1] (3.1.11)



Obr. 7 Schéma uspořádání vzorku tvaru tyče pro měření tepelné vodivosti. [1]

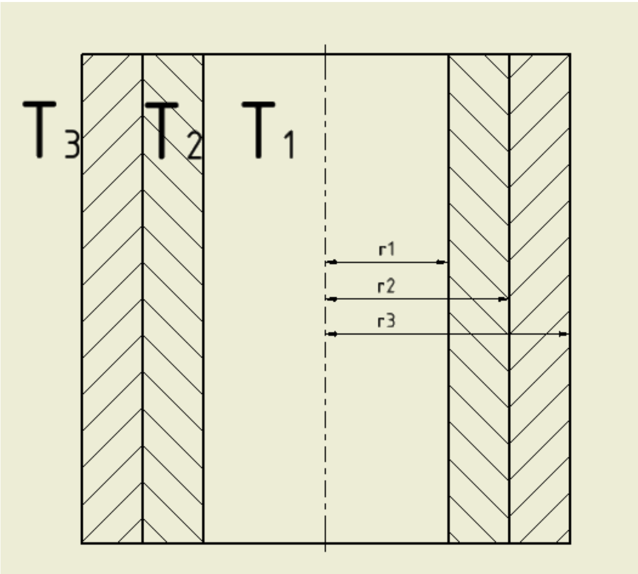
1 – normál, 2 – měřený vzorek, 3 – masivní blok, 4 – vyhřívání, 5 – průřez ve vzdálenosti 2L, 6 – průřez ve vzdálenosti L

4.1.2.3. Metoda válců

Vzorek a normál mají tvar dutých válců, které jsou do sebe zasunuty. Tepelnou vodivost lze získat ze vztahu:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\Delta T_0 \cdot \ln \frac{r}{r_1}}{\Delta T \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \tag{3.1.12}$$

Tato metoda je vhodná pro měření kapalin a sypkých látek. [1]



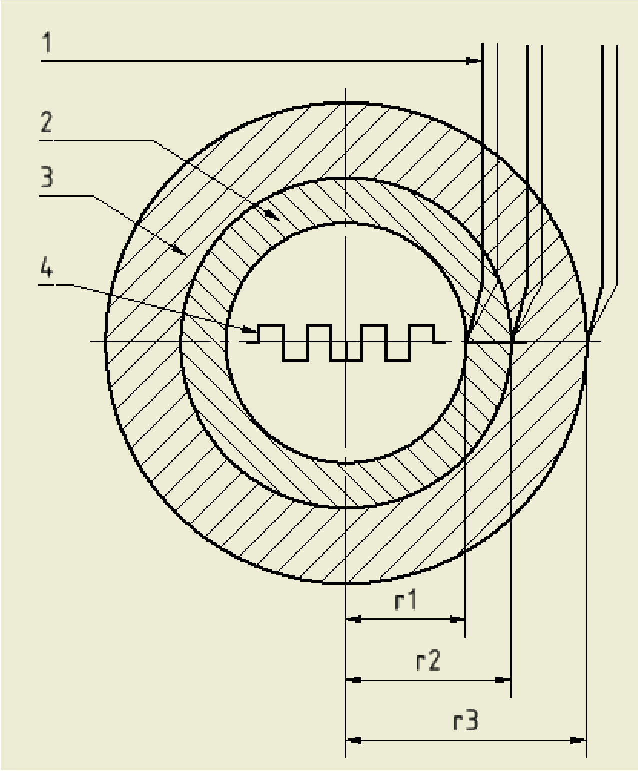
Obr. 8 Vzorek a normál dutého válce. [1]

4.1.2.4. Metoda koulí

Uspořádání je takové, že normála je vnitřní dutá koule, která je obalená druhou dutou koulí, která tvoří vzorek. Pokud je tepelný tok procházející normálou a vzorkem stejný, je možno použít vzorec pro výpočet tepelné vodivosti:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{r_1 \cdot (r_3 - r_2) \cdot \Delta T}{r_3 \cdot (r_2 - r_1) \cdot \Delta T_0} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \tag{3.1.13}$$

Podobně jako metoda válců je i tato metoda vhodná pro měření sypkých látek a kapalin. [1]



Obr. 9 Schéma na relativní měření tepelné vodivosti ve tvaru duté koule.

1 - termočlánky, 2 - měřený vzorek, 3 - normál, 4 - vyhřívání [1]

4.2. Nestacionární metody měření

Metody měření při neustáleném stavu jsou podobné jako u měření při ustáleném stavu. Na rozdíl od stacionárních metod probíhají kratší dobu a je potřeba mít zkušební vzorky s malými tloušťkami. [1]

4.2.1. Nestacionární metoda horkého drátu

Metoda horkého drátu je založena na měření nárůstu teploty v definované vzdálenosti od lineárního tepelného zdroje (horký drát), který je vložen do zkušebního materiálu. Horký drát slouží jako zdroj tepla a zároveň slouží jako teplotní čidlo.

Tato metoda se dá použít pro pevné, kapalné a sypké materiály.

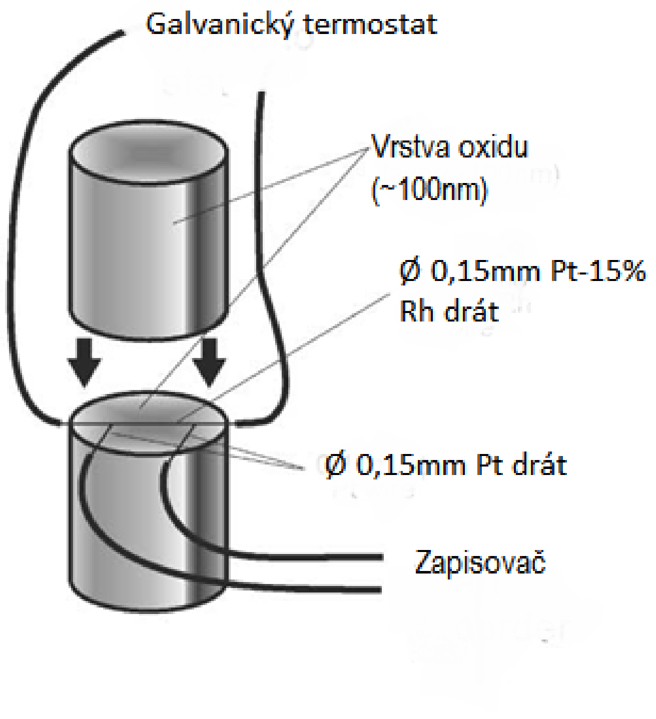
Teplotní rozdíl ΔT, který se průběžně zaznamenává, je dán vztahem:

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r^2 \cdot C} \quad , \qquad (3.2.1)$$

kde *Q [J]* je množství tepla produkovaného drátem, které je vztaženo na jednotku času a jednotkovou délku, *t [s]* je čas, λ $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je tepelná vodivost. $C = \exp(\gamma), \gamma = 0{,}5772157$ je Eulerova konstanta.

Rovnice (3.2.1) je platná, pokud je splněno $r^2/4 << 1$ po dostatečně dlouhou dobu *t*, která je větší než určitý minimální čas t_{min} a pro malé vzdálenosti *r*.

Čidlo je v křížovém uspořádání. V křížové technice je kříž drátu vsazen do rýh mezi dva stejné vzorky. Kříž je složen z tepelného čidla a topného drátu. Při použití odporového topného drátu se změna teploty projeví změnou odporu čidla (drátu). [8] [9]



Obr.10 Metoda horkého drátu [9]

Praktická část

5. Cíl měření

Cílem je změření tepelné vodivosti na dodaných vzorcích z různých materiálů. Měření bude probíhat na dvou přístrojích ve zrenovovaných laboratořích na Katedře energetických zařízení.

5.1. Měření na přístroji C-Therm

5.1.1. Popis přístroje C-Therm

Obr. 11 Přístroj C-Therm [6]

Tento přístroj je již třetí generací přístrojů pro měření tepelné vodivosti. C–Therm je rychlý, nedestruktivní testovací nástroj technologie tepelné vodivosti. Navržený pro jednoduché, vysoce přesné teplotní charakteristiky tepelné vodivosti a tepelné efuzivity v laboratorním prostředí, kontrolu kvality a produkce. C – Therm TCi^{TM} analyzátor tepelné vodivosti nevyžaduje žádnou kalibraci nebo přípravu vzorku. Systém má široké možnosti testování $(0-120\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ v širokém rozsahu teplot (-50°C – 200°C). [6]

Přístroj používá jednostranný mezi-kontaktní teplotně odrazivý snímač, který se skládá z měřícího čidla, řídící elektroniky a počítačového softwaru. Ve snímači je topné těleso a čidlo ve tvaru spirály obemknuté

ochranným kroužkem. Vzniklé teplo během testu proudí směrem od senzoru do materiálu. Přesně definovaný proud je přiváděný na čidlo topného tělesa, které produkuje malé množství tepla. Výsledkem je narůst teploty na rozhraní senzoru a vzorku, které je obvykle méně než 2°C. Tento narůst teploty na rozhraní snímače vyvolá změnu, úbytek napětí čidla. Tempo růstu napětí ve snímači se používá k určení tepelně-fyzikálních vlastností materiálu vzorku. Termo-fyzikální vlastnosti vzorku (tepelná vodivost) jsou nepřímo úměrné tempu růstu napětí na snímači. [10]

Mezi klíčové funkce a výhody tohoto systému patří možnost testovat:

- materiály v rozsahu $(0 \div 120 \ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ tepelné vodivosti
- pevné látky, kapaliny, prášky a pasty
- široký teplotní rozsah 50 - 200 ° C
- správnost a přesnost lepší než 5% respektive 1%. (Uvedená od 0°C do 50°C). [6]

5.1.2. Měření

Měření samotné probíhalo na devíti dodaných vzorcích na *Obr.12*, podle vytvořeného návodu, který je v příloze 1. Na každém vzorku proběhlo deset měření. Výsledky měření tepelné vodivosti, které jsou uvedené v tabulce 1, jsou střední hodnoty a odchylky z oněch deseti měření. Taktéž je tomu i v případě tabulky 2, kde jsou výsledky z měření teplotní vodivosti. V tabulce jsou uvedeny střední hodnoty a odchylky. Výsledky jsou zpracované pomocí programu Microsoft Office Excel. Na prvních osmi vzorcích byla jako kontaktní médium použita destilovaná voda, na devátém dřevěném vzorku byl použit silikonový gel Wakefield 120 Thermal Grease. V tabulce 5 je uveden medián měřených vzorků.

Medián (Me) je prostřední hodnota z naměřených hodnot, které jsou seřazené dle velikosti. V tomto případě je to průměr prostředních čísel, jelikož byl proveden sudý počet měření.

U několika měřených materiálů se mi podařilo dohledat referenční hodnoty tepelných vodivostí jako u plexiskla (vzorek č.1), polystyrenu

(vzorek č.2), silikonová guma (vzorek č.3), pyroceramu (vzorek č.8), dřeva (dřevěná substance,vzorek č.9) a žuly. Střední hodnoty telených vodivostí naměřených vzorků se od referenčních hodnot liší v řádu desetin, setin a někdy i nižší (tab.4).

Během mého měření byla Katedra energetických zařízení požádána o změření tepelné vodivosti na deseti vzorcích geopolymeru a dvou vzorcích žuly, bílého typu a tmavého typu. Na všech dvanácti vzorcích proběhlo dvacet měření na třech různých místech.

Na vzorcích ze žuly byla také jako kontaktní médium použita destilovaná voda. Vzorky ze žuly měly podobu krychle o hmotnosti cca 3kg s hladkými stěnami. Každé měření bylo provedeno na jiné stěně krychle. Hodnoty naměřené na vzorcích se pohybovaly v intervalu $(2{,}9 \div 4{,}0\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ daným pro tento materiál.

Geopolymer je anorganický polymer křemičitanu hliníku získaný syntézou převážně křemičitých a hlinitých materiálů geologického původu nebo vedlejších produktů jako je popílek, struska. Jeho vlastnosti jsou především vysoká pevnost, mrazuvzdornost, žáruvzdornost. [11]

Vzorky geopolymeru byly dodány v podobě válců o hmotnosti podobné vzorkům žuly. Podle zadavatele se tepelná vodivost měla být kolem $5\ [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$. Tohoto čísla se nám při měření zřídkakdy povedlo dosáhnout a naměřené hodnoty někdy nedosáhly ani poloviny požadované hodnoty. To bylo především způsobeno špatnou povrchovou úpravou vzorků a vysoké pórovitosti povrchu. Jako kontaktní médium byl použit silikonový gel Wakefield 120 Thermal Grease, protože destilovaná voda se okamžitě vsákla do vzorku.

V tabulce 3 jsou uvedeny střední hodnoty a odchylky ze dvou měření geopolymeru z jednoho vzorku a po jednom z měření žuly bílého a tmavého typu.

Obecný vzorec pro výpočet střední hodnoty:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=10}^{n} x_i \quad , \qquad (4.2.1)$$

kde $\overline{x}$ značí střední hodnotu v jednotkách měřené veličiny. V našem případě $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ nebo $[m^2 \cdot s^{-1}]$, x_i je naměřená hodnota a má stejné jednotk jako $\overline{x}$ a *i* je číslo měření u jednotlivých vzorků $(i = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ 10)$. Malé *n [-]* udává počet měření (v našem případě 10).

Obecný vzorec pro výpočet odchylky:

$$\overline{s}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{x} - x_i\right)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad , \qquad (4.2.2)$$

kde $\overline{s}_x$ je odchylka, která také vychází v měřených veličinách.

Obr. 12 Vzorky pro měření.

Tabulka 1

Vzorek	$\overline{\lambda}$ [W/m·K]	$\overline{s}_\lambda$ [W/m·K]	průměrná teplota °C
1	0,2304	0,0031	22
2	0,1596	0,0163	22,5
3	0,3609	0,0053	23
4	0,1684	0,0015	23,2
5	0,4819	0,0038	23,4
6	0,1901	0,002	23,5
7	0,2853	0,0028	23,6

8	3,7696	0,0399	23
9	0,892	0,0476	23,7

Tabulka 2

Vzorek	$\overline{a}$ [m^2/s]	$\overline{s}_a$ [m^2/s]	průměrná teplota °C
1	1,33·10^-7	1,76·10^-9	22
2	9,21·10^-8	9,39·10^-9	22,5
3	2,9·10^-7	306·10^-9	23
4	9,72·10^-8	8,59·10^-9	23,2
5	2,78·10^-7	2,17·10^-9	23,4
6	1,0·10^-7	1,1·10^-9	23,5
7	1,65·10^-7	1,22·10^-9	23,6
8	1,91·10^-6	1,87·10^-8	23
9	1,62·10^-7	9,21·10^-9	23,7

Tabulka 3

Vzorek	$\overline{\lambda}$ *[W/m·K]*	$\overline{s}_\lambda$ [W/m·K]	λ_{ref} [W/m·K]	prům. tep. °C
Geopolymer 1.měř.	4,421	0,32	5	25,4
Geopolymer 2.měř.	3,953	0,332	5	27,3
Žula bílého typu	3,694	0,032	2,9-4,0	24,8
Žula tmavého typu	3,782	0,045	2,9-4,0	23,8

Tabulka 4

Vzorek	$\overline{\lambda}$ *[W/m·K]*	λ_{ref} *[W/m·K]*
Plexisklo	0,2304	0,2
Polystyren	0,1596	0,16
Silikonova guma	0,3609	0,35
Pyroceram	3,7696	3,967
Dřevěná sustance	0,892	0,88
Žula bílého typu	3,694	2,9-4,0
Žula tmavého typu	3,782	2,9-4,0

Tabulka 5

Vzorek	Me [m^2/s]	Me [W/m·K]
1	1,33·10^-7	0,2302
2	9,35·10^-8	0,1618
3	2,09·10^-7	0,3607
4	9,73·10^-7	0,1685
5	2,78·10^-7	0,4814
6	1,10·10^-7	0,1901
7	1,65·10^-7	0,2852

8	$1{,}90\cdot10^{-6}$	3,751
9	$1{,}64\cdot10^{-7}$	0,89

5.2. Měření na přístroji Lambda HFM436/1E

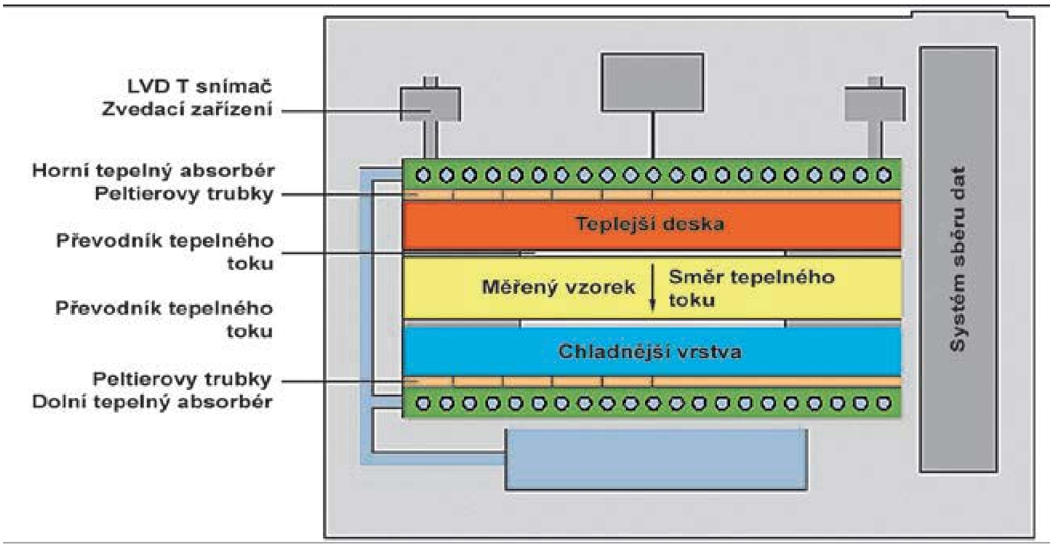
5.2.1. Popis přístroje Lambda HFM436/1E

Obr. 13 Lambda HFM 436/1E

Tento měřící přístroj umožňuje provádět automatizované měření velikosti tepelné vodivosti izolačních materiálů, až pro deset předvolených středních teplot měřeného materiálu. Teplotní rozsah tohoto zařízení je od -30°C do +90°C. Rozsah pro měření tepelné vodivosti je $(0{,}005 \div 0{,}5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ Správnost dosažených výsledků se udává $\pm 1 \div 3\%$. Typický tvar vzorku je čtvercová deska o délce strany 305 mm a výšce od 5 mm až do 100 mm. Rovnovážného stavu měřícího zařízeni je dosaženo za přibližně 15 minut. [13] [14]

Princip měření spočívá ve zjišťování velikosti tepelného toku, který prochází měřeným materiálem při definovaném teplotním spádu. Tepelný tok je zjišťován napěťovým převodníkem tepelného toku, který je zabudovaný v horní desce, která má vyšší teplotu a také v dolní desce, která má teplotu nižší. Výstupní napěťový signál je úměrný velikosti tepelného toku, který prochází těmito převodníky. Teplotní spád na měřeném vzorku je zjišťován pomocí termočlánků, které jsou zabudované

do povrchů obou desek. Teplota desek je řízena chladícím (ohřívacím) systémem s Peltierovými články s externím chladičem. [13] [14]



Obr. 14 Znázornění hlavních částí měřícího přístroje Lambda HFM 436/1E. [14]

5.2.2. Měření

Měření samotné probíhalo na dvou vzorcích, podle vytvořeného návodu, který je v příloze 1. Měření velikosti tepelné vodivosti bylo provedeno pro hodnoty středních teplot v rozsahu od -15°C do + 65°C s teplotním spádem na měřeném vzorku 20°C. V tabulce 6 jsou uvedeny střední hodnoty a odchylky naměřených hodnot. Výsledky jsou zpracované pomocí programu Microsoft Office Excel.

Měřené materiály byly, extrudovaný polystyren (XPS) a skelná vata.

Vzorek extrudovaného polystyrenu jsem si vypůjčil z naší stavby rodinného domu, kde ho použijeme na zateplení základové desky. Extrudovaný polystyren má oproti běžnému polystyrenu lepší vlastnosti. Má větší pevnost a lepší tepelně izolační vlastnosti než běžný polystyren.

Také vzorek skelné vaty jsem si vypůjčil ze stavby, kde bude využita na zateplení střechy a stropu, opět právě kvůli jejím izolačním vlastnostem.

Tabulka 6

Vzorek	$\bar{\lambda}$ *[W/m·K]*	$\bar{s}_{\lambda}$ [W/m·K]	λ_{ref} [W/m·K]	Me [W/m·K]

XPS	0,0347	0,0024	0,035	0,0345
Skelná vata	0,0392	0,0031	0,037	0,0389

6. Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o základních teoretických znalostech sdílení tepla. Jsou zde popsány některé metody stacionárního a nestacionárního vedení tepla v pevných látkách.

Měření proběhlo na dvou různých přístrojích. Prvním z nich j e přístroj C-Therm. Jeho výhodou je snadná ovladatelnost, nízká hmotnost a díky tomu je lehce přenosný a především při měření je velice rychlý. Jeho nevýhodou je TCi 2.4 Software, který je má občas tendenci sám se vypnout uprostřed měření nebo při ukládání výsledků.

Druhým přístrojem je přístroj Lambda HFM 436/1E. Měření na něm je časově delší, zato přesnější. Tento přístroj je těžký. Zdlouhavé je zadávání různých parametrů do programu Q-Lab, které jsou nutné pro samotné měření.

Vypočítané střední hodnoty tepelných a teplotních vodivostí se od referenčních hodnot, které byly k dispozici, lišily v řádu desetin a setin. Domnívám se, že to bylo způsobeno špatným zadáním některých parametrů v případě přístroje HFM. V případě přístroje C-Therm to bylo způsobeno nedostatečně hladkým povrchem měřených vzorků.

Literatura

[1] KREMPASKÝ, Július. Meranie termofyzikálných veličin. 1. vyd., Vydavateľstvo Slovenskej akademie vied v Bratislave, 1969. 288 s. ISBN 71-0,44-69

[2] CHYSKÝ, Jaroslav; HEMZAL, Karel a kol.. Větrání a klimatizace, Technický průvodce, ročník XLVIII. v BOLIT-B press Brno, 1993, 560 s. ISBN 80-901574-0-8

[3] HOLLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fyzika-Vysokoškolská učebnice fyziky. 5. Vyd., VUTIUM a PROMETHEUS, Praha, 2001. ISBN 80-214-1869-9

[4] Tepelné vlastnosti: http://ceg.fsv.cvut.cz/ [online].c2000-2014 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/zkousky/tepelne-vlastnosti/tepelne-vlastnosti

[5] Vedení tepla: Wikipedia: cs.wikipedia.org/ [online]. [cit. 2013-12-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vedeni_tepla

[6] C-Therm, manuál k přístroji, c2013 C-Therm Technologies Ltd.

[7] Tepelná vodivost: Wikipedia: cs.wikipedia.org/ [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: ttp://cs.wikipedia.org./wiki/Tepelna_vodivost

[8] Hot wire method: www.tpl.fpv.ukf.sk/ [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: http://www.tpl.fpv.ukf.sk/engl_vers/hot_wire.htm

[9] Eiji Yamasue; Mahasiro Susa; Hiroyuki Fukuyama; Kazuhiro Nagata. Thermal conductivities of silicon and germanium in solid and liquid states measured by non-stationary hot wire method with silica coated probe. Journal of Crystal Growth 2002, 234, 121-131, www.researchgate.net/ [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z:

http://www.researchegate.net/profile/Eije-Yamasue/publication/223794570-Thermal_conductivity.pdf

[10] C-Therm: www.ctherm.com/ [online]. c2014 [cit. 2013-12-25]. Dostupné z: http://www.ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/how_the_tci_works/

[11] Geopolymer: www.fce.vutbr.cz [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Kynclova_Magdalena_CL.pdf

[12] Nucené proudění: www.fzp.ujep.cz [online]. [cit. 2014-06-27]. Dostupné z: http://www.fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/ptu/pt_sdileni_tepla.doc

[13] Lambda HFM 436/1E, manuál k přístroji, Netzsch.

[14] HFM 436: www.stavebnictvi3000.cz [online]. [cit. 2014-06-29]. Dostupné z: http:// http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/mereni-soucinitele-tepelne-vodivosti-pomoci-merici/

Seznam symbolů

$\dot{Q}$	Množství tepla
$\dot{q}$	Hustota tepelného toku
λ	Tepelná vodivost
a	Teplotní vodivost
c	Měrná teplená kapacita
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
ε	Emisivita
γ	Eulerova konstanta
T	Teplota
β	Koeficient odvodu tepla
t	Čas
ρ	Hustota
P_r	Výkon vyzařujícího předmětu
P_a	Výkon absorpce energie záření
P_Σ	Úhrnný výkon
S	Teplosměnná plocha
λ_{ref}	Známá tepelná vodivost
$\bar{x}$	Střední hodnota
$\bar{s}_x$	Odchylka

Seznam obrázků

Obr. 1 Průběh teploty při nestacionárním vedení tepla. [4]………..…...13

Obr. 2 Schéma uspořádání planparalelní destičky pro měření tepelné vodivosti stacionární metodou. [1]……………………………………………17

Obr. 3 Vzorek tvaru dutého válce pro měření tepelné vodivosti. [1]…...18

Obr. 4 Vzorek ve tvaru duté koule pro měření tepelné vodivosti. [1]…..19

Obr. 5 Schéma uspořádání pro měření tepelné vodivosti.

1 - ohřívač, 2 - vzorek, 3 - izolace [1]…………………………………..….20

Obr. 6 Schéma uspořádání pro Stuckese-Chasmarova relativní měření tepelné vodivosti.1 - vyhřívání, 2 - teplejší blok, 3 - termočlánky, 4 - vzorek, 5 - normál,6 - chladnější blok [1]……………………………….….21

Obr. 7 Schéma uspořádání vzorku tvaru tyče pro měření tepelné vodivosti. [1] *1 – normál, 2 – měřený vzorek, 3 – masivní blok, 4 – vyhřívání, 5 – průřez ve vzdálenosti 2L, 6 – průřez ve vzdálenosti L………………………………………………………………………..…..22*

Obr. 8 Vzorek a normál dutého válce. [1]…………………………………23

Obr. 9 Schéma na relativní měření tepelné vodivosti ve tvaru duté koule.

1 - termočlánky, 2 - měřený vzorek, 3 - normál, 4 - vyhřívání [1]…..….24

Obr.10 Metoda horkého drátu [9]……………………………………….25

Obr. 11 Přístroj C-Therm [6]……………………….……………………..…26

Obr. 12 Vzorky pro měření…………………………………………..……..29

Obr. 13 Lambda HFM 436/1E…………………………………………..….31

Obr. 14 Znázornění hlavních částí měřícího přístroje Lambda HFM 436/1E. [14]…………………………………………………………………..32

Seznam tabulek

Tabulka 1……………………………………………………………29

Tabulka 2……………………………………………………………30

Tabulka 3……………………………………………………………30

Tabulka 4……………………………………………………………30

Tabulka 5……………………………………………………………30

Tabulka 6…………………………………………………………...32

Příloha

Stanovení tepelné vodivosti pevných látek pomocí přístroje C-Therm

Obr. 1 C-Therm TCi analyzátor, snímač, notebook

Zadání: Pomocí přístroje C-Therm změřte tepelnou vodivost dodaných vzorků.

<u>Přístroj C-Therm:</u> Přístroj třetí generace C–Therm je rychlý, nedestruktivní testovací nástroj pro zjišťování tepelné vodivosti. Navržený je pro jednoduché, vysoce přesné měření teplotní charakteristiky tepelné vodivosti a tepelné efuzivity v laboratorním prostředí. C – Therm TCi™ je analyzátor tepelné vodivosti, který nevyžaduje žádnou kalibraci nebo přípravu vzorku. Mezi klíčové funkce a výhody tohoto systému patří možnost testovat:

- materiály v rozsahu $(0 \div 120\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ tepelné vodivosti nebo efuzivitu od 0 ÷ 19000 $J/(s^{\frac{1}{2}} \cdot m^2 \cdot K)$
- pevné látky, kapaliny, prášky a pasty
- široký teplotní rozsah -50 ÷ 200 ° C při použití teplotní komory
- přesnost měření je lepší než 5% respektive 1%. (Pro měření od 0°C do 50°C)

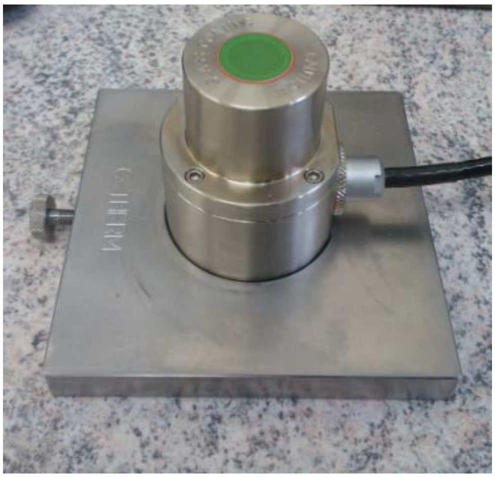
<u>Princip měření:</u> Princip měření spočívá v přivádění známého elektrického proudu do snímače, který zahřívá vzorek. Zvýšení teploty na rozhraní mezi snímačem a vzorkem bývá menší než 2°C. Toto zvýšení teploty na rozhraní snímač - vzorek vyvolá změnu elektrického napětí snímacího prvku.

Tepelná vodivost: Tepelná vodivost je schopnost materiálu (tekutiny, prášku, pěny, tkaniny, polymeru, keramiky, kovu) vést teplo. Je to rychlost, kterou se teplo šíří ze zahřáté části látky do chladnější. Značí se řeckým písmenem λ a její základní jednotkou je $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$.

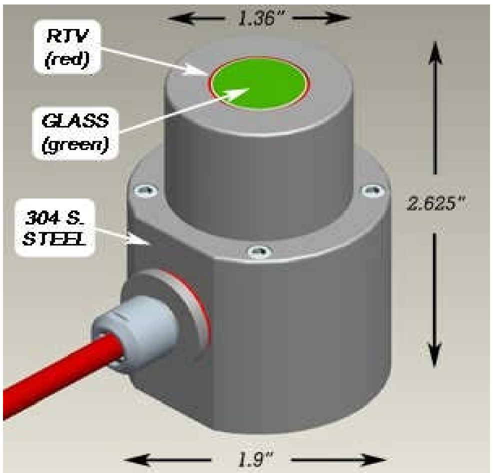
!!! Důležité upozornění: Neodpojovat snímač, nepoškrábat ho, nenamáhat mechanicky, opatrně odebírat vzorky ze snímače.!!!

Postup měření:

1) Zapneme notebook.
2) Zapneme C-Therm TCi analyzátor.
3) Na notebooku spustíme zástupce TCi 2.4
4) Navlékneme si rukavici a umístíme vzorek materiálu na snímač (Rukavice zabraňuje poškození snímače a zaručuje, že nedojde k zahřátí vzorku).

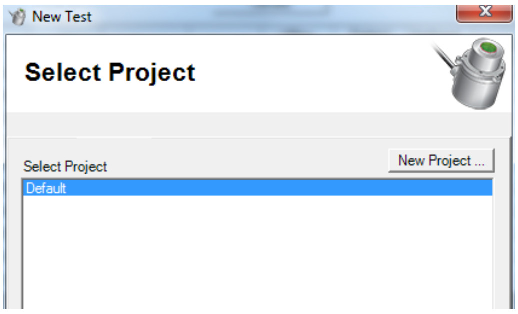


Obr. 2 Snímač

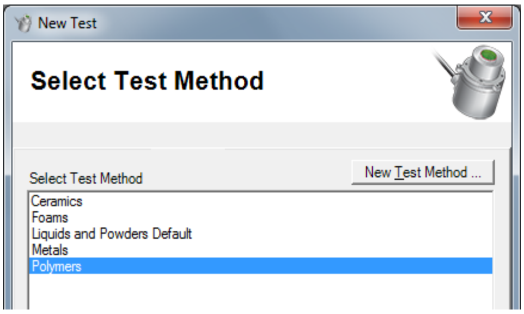


Obr. 3 Popis snímače

5) Klikneme na tlačítko **New Test** na panelu nástrojů
6) Vybereme projekt ,,Default" a klepněte n tlačítko **Next**, viz *obr. 4*.

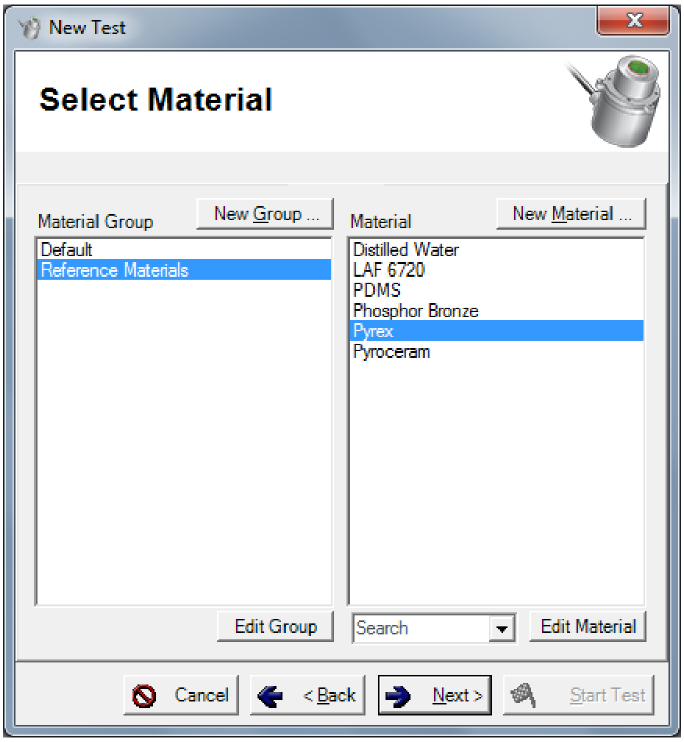


Obr. 4



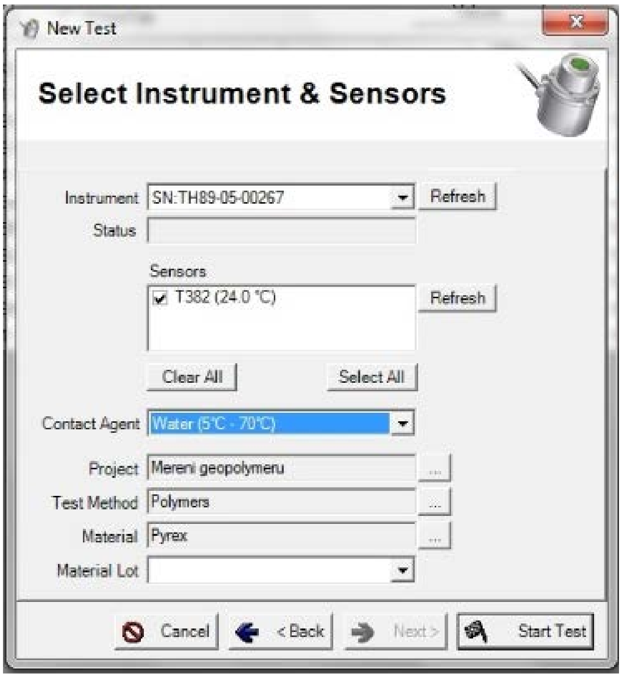
Obr. 5

7) Vybereme testovací metodu, která má být použita a klikněte na **Next**, viz *obr. 5*.
8) Vybereme materiálovou skupinu a materiál pro testování a klikněte na **Next**, viz *obr. 6*.

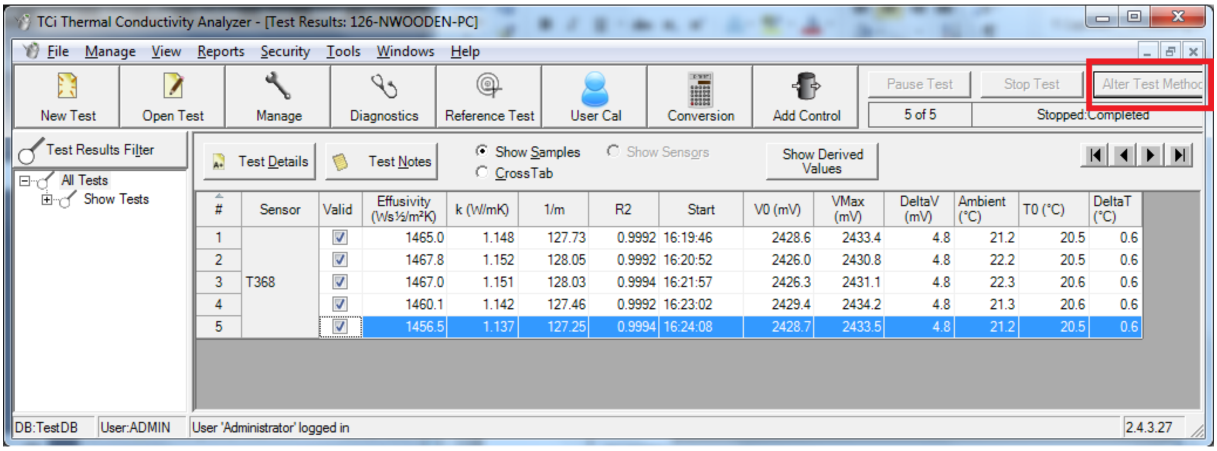


Obr. 6

9) Vyberte nástroj (Instrument) SN:TH89-05-00267, senzory (Sensors) T382, kontaktní látku (Contact Agent) a klikněte na **Start Test**.



Obr. 7



Obr. 8

Po spuštění testu v pravém horním rohu klikněte na **Alter Test Method** a do políčka **Number of Measurements** napište počet měření 5 (na obr. 8 vyznačeno červeným obdélníkem).

Pozn.: Pokud je některá buňka červená, měření není platné a je třeba ho opakovat. Zkontrolujte hodnotu R_2 každého měření. V případě, že je hodnota R_2 menší než 0,995, měření může být neplatné. Oranžová buňka znamená, že tepelná hodnota vodivosti nebo efuzivity je mimo kalibrační rozsah této skupiny materiálů.

Tabulka 1: vzorek 1

Číslo měření	λ [W/m·K]	a [m^2/s]	e[W/s$^{1/2}$·m^2·K]
1			
2			
3			
4			
5			

Tabulka 2: vzorek 2

Číslo měření	λ [W/m·K]	a [m^2/s]	e[W/s$^{1/2}$·m^2·K]
1			
2			
3			
4			
5			

Výpočet: Vypočítejte střední hodnoty a směrodatné odchylky tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a tepelné efuzivity. Vypočtené průměry a směrodatné odchylky napište do tabulky 3.

Výpočtové vztahy: aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=5}^{n} x_i$

směrodatná odchylka $\bar{s_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{x}-x_i)^2}{n\cdot(n-1)}}$

Tabulka 3:

	λ_1 [W/m·K]	λ_2 [W/m·K]	a_1 [m²/s]	a_2 [m²/s]	e_1 [W/s^1/2·m²·K]	e_2 [W/s^1/2·m²·K]
$\bar{x}$						
$\bar{s}$						

Závěr: Porovnejte vypočtené průměry, směrodatné odchylky jednotlivých vzorků a porovnejte je mezi sebou.

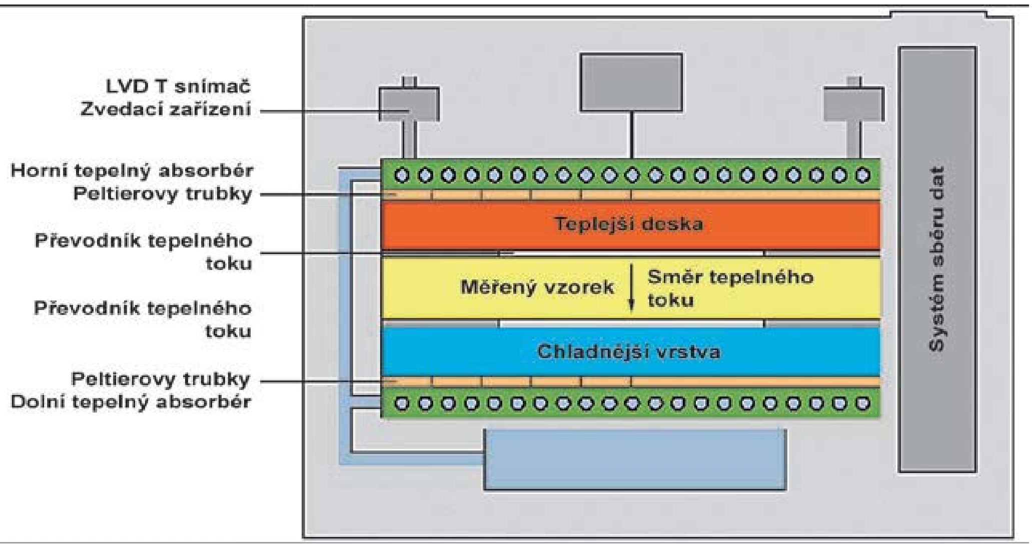
Stanovení tepelné vodivosti pevných látek pomocí přístroje Lambda HFM 436/1E

Obr. 1 Lambda HFM 436/1E

Zadání: Přístrojem Lambda HFM 436/1E změřte tepelnou vodivost dodaných vzorků pro hodnoty od 0°C do +40°C (s krokem 10°C) při teplotním spádu na měřeném vzorku 20°C. V průběhu testu zapisujte okamžité hodnoty tepelné vodivosti do tabulky 1, které jsou pomocí vnitřního a vnějšího programového vybavení zaznamenávány v minutových intervalech.

Přístroj Lambda HFM 436/1E: Tento měřící přístroj umožňuje provádět automatizované měření velikosti tepelné vodivosti izolačních materiálů, až pro deset předvolených středních teplot měřeného materiálu. Teplotní rozsah tohoto zařízení je od -30°C do +90°C. Rozsah pro měření tepelné vodivosti je $(0{,}005 \div 0{,}5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ Správnost dosažených výsledků se udává $\pm 1 \div 3\%$. Typický tvar vzorku je čtvercová deska o délce strany 305 mm a výšce od 5 mm až do 100 mm. Rovnovážného stavu měřícího zařízeni je dosaženo za přibližně 15 minut.

Princip měření : Princip měření spočívá ve zjišťování velikosti tepelného toku, který prochází měřeným materiálem při definovaném teplotním spádu. Tepelný tok je zjišťován napěťovým převodníkem tepelného toku, který je zabudovaný v horní desce, která má vyšší teplotu a také v dolní desce, která má teplotu nižší. Výstupní napěťový signál je úměrný velikosti tepelného toku, který prochází těmito převodníky. Teplotní spád na měřeném vzorku je zjišťován pomocí termočlánků, které jsou zabudované do povrchů obou desek.

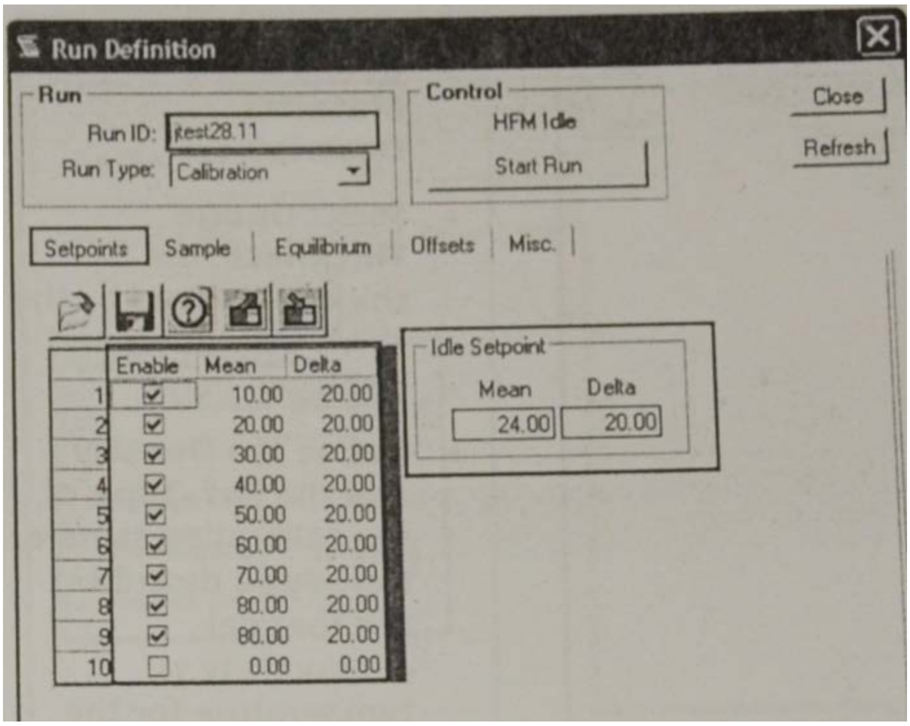


Obr. 2 Znázornění hlavních částí měřícího přístroje Lambda HFM 436/1E.

<u>Tepelná vodivost:</u> Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Číselně to vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu projde vrstvou o tloušťce 1m a plochou 1m^2 při rozdílu teplot 1K na obou stranách vrstvy. Závisí na struktuře hmoty, její hustotě, vlhkosti, tlaku a teplotě. Značí se malým řeckým písmenem *λ* a její jednotkou je $\left(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}\right)$. Podle tohoto součinitele se látky dělí na tepelné vodiče - látky s vysokou rychlostí vedení tepla a velkým součinitelem tepelné vodivosti a tepelné izolanty - látky s nízkou rychlostí vedení tepla a malým součinitelem tepelné vodivosti.

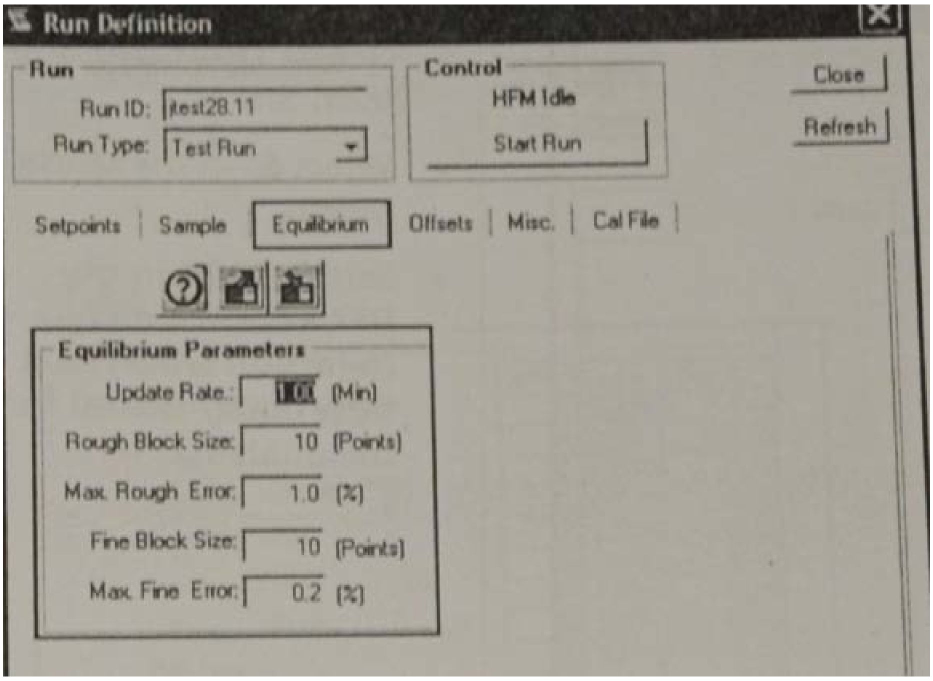
<u>Postup měření:</u>

1) Zapneme přístroj HFM-monitor-tiskárnu-počítač-termostat.
2) Po zapnutí hlavního vypínače proběhne inicializace systému a potom je třeba stisknout tlačítko **RESET** na zadní straně přístroje.
3) Otevřeme dvířka, která se vyklápějí směrem dolů a vložíme vzorek. Pomocí tlačítka uvnitř spustíme horní desku. U pevných desek se systém zastaví sám, u měkkých zastavíme ručně.
4) Na počítači spustíme program QLab.
5) Po otevření programu klikneme na záložku **Run** a vybereme **Test Definition**.
6) Zvolíme **Run Type**.
7) Vyplníme **Run ID**. Klikneme na záložku **Setpoints**, kam zadáme teplotu, při které začne měření a další teploty, ve kterých chceme změřit tepelnou vodivost a teplotní rozdíl ΔT mezi horní a dolní deskou (podobně jako na *Obr. 3*).



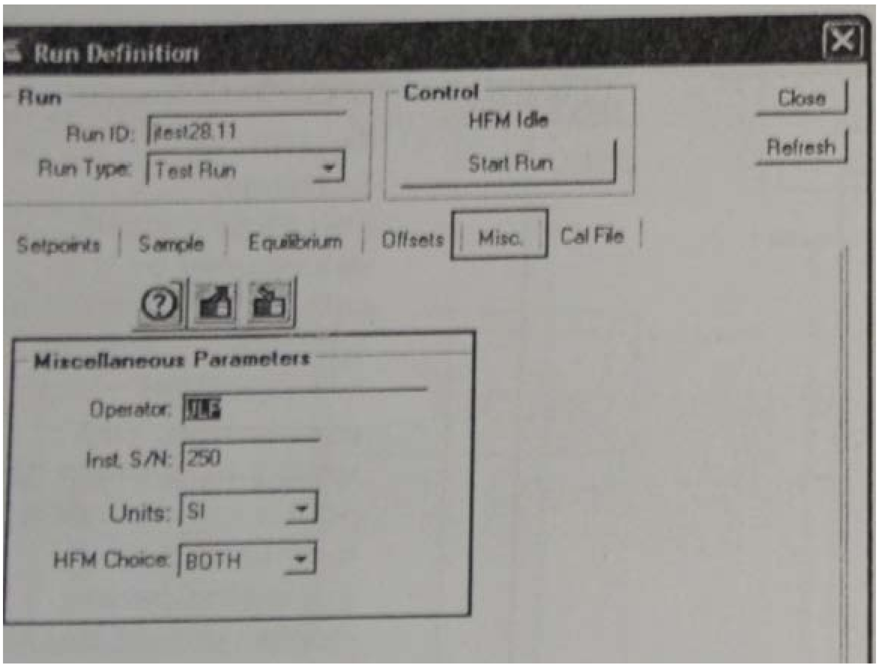
Obr. 3

8) Vybereme záložku **Sample** (vzorek) a vyplníme **Sample ID** a **Density** (hustota).
9) Vybereme záložku **Equilibrium** (rovnováha) a vyplníme jí.viz *Obr. 4*.



Obr. 4

10) V záložce **Offsets** zkontrolujeme, že je zatržené **Auto Plate adjut.**
11) Vyplníme záložku **Misc** dle *Obr. 5.*



Obr. 5

12) Zvolíme záložku **Cal File** a klikneme na **Start Run**, tím začne měření.

Tabulka 1

	1	2	3	4	5
Vzorek 1					
Vzorek 2					

hodnoty v tabulce jsou v jednotkách [W/m·K]

Výpočet: Vypočítejte střední hodnoty a směrodatné odchylky tepelné vodivosti. Výsledky zapište do tabulky2.

Výpočtové vztahy: aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=5}^{n} x_i$

směrodatná odchylka $\bar{s_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$

Tabulka 2

	λ_1 [W/m·K]	λ_2 [W/m·K]
$\bar{x}$		
$\bar{s}$		

Závěr: Porovnejte vypočtené průměry, směrodatné odchylky jednotlivých vzorků a porovnejte je mezi sebou.