

# Měření tepelných vlastností materiálů

Jiří Bittner

---

Bakalářská práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří BITTNER**  
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**  
Téma práce: **Měření tepelných vlastností materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerže na dané téma
2. Použití české i zahraniční literatury
3. Metody měření
4. Porovnání jednotlivých metod



Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Urbanec**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2005**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2006**

Ve Zlíně dne 7. února 2006

  
prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.  
děkan



  
prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

V současné době se tepelné charakteristiky materiálů měří mnoha ověřenými způsoby, jak dotykovými, tak i bezdotykovými. Mezi používané metody patří kromě dotykových měření jako jsou klasické nestacionární metody např. podle Fitcha, rovněž stále častěji používané bezdotykové způsoby měření založené např. na využití IČ senzorů.

Klíčová slova:

tepelná vodivost, teplotní vodivost, měrné teplo

## **ABSTRACT**

In this time are thermal characteristics of materials measuring by many tested ways. Tangent and today current untangent ways. Into tangent measure like etc. Fitch's and so on we line up more and more useful untangent methods built on etc. using IR sensors.

Keywords:

thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat

Dovolte, abych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing.Petru Urbancovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mně poskytoval v průběhu vypracování bakalářské práce.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>8</b>
<b>1 OBECNÉ POJMY</b> .....	<b>9</b>
<b>2 MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA</b> .....	<b>10</b>
2.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM .....	10
2.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM .....	10
2.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM. ....	12
<b>3 OBECNÉ ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM</b> .....	<b>13</b>
3.1 FOURIERŮV ZÁKON VEDENÍ TEPLA .....	13
3.2 STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA .....	13
3.3 NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA .....	14
<b>4 TEPELNÉ VLASTNOSTI</b> .....	<b>15</b>
4.1 MĚRNÉ TEPLO .....	15
4.2 TEPLOTNÍ VODIVOST .....	16
4.3 TEPELNÁ VODIVOST .....	19
<b>5 METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI</b> .....	<b>21</b>
5.1 STACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI .....	21
5.1.1 DESKOVY PŘÍSTROJ PODLE POENSGENA .....	21
5.1.2 PODOBNÉ DESKOVÉ PŘÍSTROJE.....	23
5.1.3 PŘÍSTROJ DR. BOCKA.....	25
5.1.4 VÁLCOVÝ PŘÍSTROJ PODLE VAN RINSUMA.....	27
5.1.5 KULOVÝ PŘÍSTROJ PODLE NUSSELTA .....	27
5.2 NESTACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI .....	28
5.2.1 FITCHOVA METODA .....	29
5.2.2 PŘÍSTROJ PVT 100 .....	31
<b>6 NOVĚJŠÍ METODY MĚŘENÍ</b> .....	<b>32</b>
6.1 PŘÍSTROJ ISOMET 2104.....	32
6.2 METODA HORKÉHO DRÁTU .....	33
6.3 PŘÍSTROJ THERMOPHYSICAL TRANSIENT TESTER RT 1.02 .....	35
6.4 PŘÍSTROJ CFTT - 05 .....	35
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>39</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>40</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>42</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>43</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>44</b>

## ÚVOD

Procesy sdílení tepla jsou jednou ze základních součástí výrobní technologie ve všech průmyslových odvětvích, narůstá zde snaha snížit energetickou náročnost výrobků. Aby bylo možné se touto problematikou zabývat, je také důležitá znalost tepelných charakteristik nejrůznějších materiálů. Obzvláště významné jsou otázky nestacionárního sdílení tepla, protože značné množství technologických operací probíhá v nestacionárním režimu.

V současné době se tepelné parametry materiálů měří mnoha ověřenými způsoby, jak dotykovými, tak i bezdotykovými. Mezi používané metody patří kromě dotykových měření jako jsou klasické nestacionární metody např. podle Fitcha, rovněž stále častěji používané bezdotykové způsoby měření založené např. na využití IČ senzorů.

Cílem předkládané bakalářské práce je teoretické popsání některých dosud používaných stacionárních i nestacionárních metod měření tepelných parametrů materiálů.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**



## 1. OBECNÉ POJMY

Teorie sdílení tepla je značně rozsáhlá. Sdílení tepla se zabývá procesy přenosu tepla. Přenos tepla je nerovnovážný termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase. Podmínkou sdílení tepla je existence teplotního rozdílu. Ačkoli sdílení tepla je velmi složitý děj, je možné jeho dělení na:

- sdílení tepla vedením (kondukcí)
- sdílení tepla prouděním (konvekcí)
- sdílení tepla sáláním (radiací)

Ve skutečnosti se neseťkáváme s jednotlivými druhy sdílení tepla izolovaně, nýbrž s jejich nejrůznějšími kombinacemi.

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

Přestupem tepla nazýváme výměnu tepla mezi stěnou tuhého tělesa a obtékající kapalinou nebo plynem.

Prostupem tepla nazýváme sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělenými tuhou stěnou.

## 2. MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA

Sdílení tepla (předávání tepla, přenos tepla, transport tepla) může probíhat třemi základními mechanismy: vedením, prouděním, sáláním [1].

### 2.1. Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením nastává předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Vedení tepla je tedy molekulárním mechanismem sdílení tepla. Molekuly a elektrony mají v místě vyšší teplotou vyšší kinetickou energii než v místě s nižší teplotou. Jelikož se kinetická energie přenáší z molekuly na molekulu nebo z elektronu na elektron, závisí tento přenos značně na vlastnostech prostředí, v němž se teplo vede, tj. na vlastnostech molekul a elektronů a na jejich vzdálenosti.

Vedení tepla se týká látek pevných, kapalných i plyných. Snižování tlaku u plynů vede ke vzdalování molekul a ke zvyšování odporu proti vedení tepla. Plyny, zejména při velmi nízkém tlaku, jsou velmi špatnými vodiči tepla, stejně jako některé pevné látky, a proto se jich využívá k tepelné izolaci zařízení. Volné a vysoce pohyblivé elektrony kovových materiálů jsou příčinou jejich vysoké vodivosti nejen elektrické, ale i tepelné [11].

### 2.2. Sdílení tepla prouděním

V pohyblivém prostředí, tj. především v tekutinách (ale též u pevných částic ve fluidní vrstvě, při pneumatickém transportu a v sesuvné vrstvě), dochází k přenosu energie z místa o vyšší teplotě na místo o nižší teplotě makroskopickým tokem částic, tj. z hlediska teorie spojitého prostředí přesunem velkých souborů molekul. Ve vícesložkových soustavách se při sdílení hmoty vytvoří koncentrační gradient, který způsobí difúzi částic a odpovídající difúzní přenos energie. Ten souvisí se sdílením hmoty a ve srovnání

s přenosem tepla vlivem proudění není obvykle významný. Přenos energie prouděním je vázán na pohybující se hmotné částice a je o řád až dva intenzivnější než pouhé molekulární sdílení (vedení tepla) v těže látce. Oba typy přenosů energie probíhají v pohyblivém prostředí souběžně.

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

Proudění tekutiny při sdílení tepla je buď volné, nebo nucené. Volné proudění je vyvoláno pouze rozdílem hustot (vlivem rozdílu teplot) u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny. Až na výjimky (např. voda v rozmezí teplot 0 až 4°C) klesá hustota tekutiny se vzrůstající teplotou. Potom např. u teplosměnné plochy s nižší teplotou, než je teplota v jádru tekutiny, dochází v gravitačním poli Země k pohybu tekutiny dolů. V jádru tekutiny, kde je vyšší teplota, dochází naopak k pohybu tekutiny směrem nahoru. V blízkosti nehybné teplosměnné plochy je rychlost proudění nízká, a proudění je zde proto laminární i při turbulentním proudění v jádru tekutiny. V tomto případě se zde vytváří laminární podvrstva, v níž se tekutina pohybuje pouze podél teplosměnné plochy. Napříč touto laminární podvrstvou nemůže tedy nastat přenos energie pohybem částic, ale jen jejich molekulárním pohybem, tj. vedením tepla.

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

Stejný mechanismus přenosu energie je při nuceném proudění, které může být realizováno různým způsobem. Z toho vyplývá různá intenzita a charakter pohybu částic tekutiny k teplosměnné ploše. Tím je dána různá intenzita přenosu energie prouděním. Např. nucené proudění může být realizováno rozdílem tlaků nebo samospádem v trubce,

nehybné vrstvě sypkého materiálu, ve fluidní vrstvě, v cyklónu, v nádobě s mechanickým míchadlem [11].

### 2.3. Sdílení tepla sáláním

Ke sdílení tepla sáláním (neboli zářením či radiací) dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. Tento proces je kvantitativně vyjadřován jako tok tepla. V tělese, které vyzařuje (emituje), dojde k přeměně vnitřní energie na energii radiační. Opačný proces nastává u druhého tělesa, které pohlcuje (absorbuje) část radiační energie, jež dopadne na jeho povrch a přemění ji na vnitřní energii (absorbovaná radiační energie). Aby k tomuto přenosu radiační energie z jednoho tělesa na druhé mohlo dojít, musí být mezi dvěma tělesy prostředí propouštějící záření. Takové prostředí se nazývá transparentní.

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

Platí:

$$E = E_r + E_a + E_t \quad (1)$$

Relativní míry jednotlivých toků jsou dány podílem z celkové zářivé energie.

Technicky se sdílení tepla sáláním uplatňuje v případě vysokoteplotních procesů, např. při sdílení tepla v pecích.

Velmi často převažuje jeden mechanismus nad ostatními. Potom můžeme při výpočtech brát v úvahu pouze dominantní mechanismus a k ostatním nepřihlížet. Pokud nelze předpokládat, že dominantní je jediný mechanismus, musíme uvažovat o složeném sdílení tepla [11].

### 3. OBECNÉ ROVNICE SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM

#### 3.1. Fourierův zákon vedení tepla

Tento zákon je základním kvantitativním vztahem pro sdílení tepla vedením. Je definován rovnicí

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla t \quad (2)$$

tj. rozepsáno do složek

$$\dot{\mathbf{q}} = i q_x + j q_y + k q_z = -\lambda \left( i \frac{\partial t}{\partial x} + j \frac{\partial t}{\partial y} + k \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Slovně vyjádřeno, je hustota tepelného toku  $\dot{q}$  úměrná teplotnímu gradientu. Konstanta úměrnosti  $\lambda$  se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Tento zákon byl odvozen z empirického poznatku, že množství tepla, které se převede mezi rovnoběžnými deskami různé teploty, které jsou ve vzdálenosti  $dl$ , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času, a nepřímo úměrně jejich vzdálenosti. Rovnice (2) lze použít k výpočtu hustoty tepelného toku, ale nelze ji použít k výpočtu průběhu teplotního pole. V tomto případě je nutno použít vztahů, které odvodíme z energetické bilance elementárního objemu [12].

#### 3.2. Stacionární vedení tepla

Při stacionárním vedení tepla není teplota funkcí času, ale jen souřadnic [5].

Pro případ bez tepelných zdrojů lze diferenciální rovnici vedení tepla napsat ve tvaru

$$\frac{\partial t}{\partial t} = a \nabla^2 t \quad (4)$$

kde jsme zavedli konstantu

$$a = \frac{l}{c_p \cdot r} \quad (5)$$

teplotní vodivost uvažovaného prostředí, symbolem  $\nabla^2$  rozumíme Laplaceův diferenciální operátor

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \quad (6)$$

### 3.3. Nestacionární vedení tepla

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

Popis nestacionárních teplotních polí může být určitým přibližným řešením pro reálný systém, který je velmi složitý a exaktní řešení v celé komplexnosti je ve většině případů zcela nereálné. Avšak v technické praxi nám v řadě případů nejde o znalost absolutní hodnoty určité sledované veličiny, ale zda se její velikost určitým vnějším zásahem změní žádoucím směrem. V tomto případě nám značnou službu mohou poskytnout analytická řešení limitních případů skutečných reálných dějů [12].

## 4. TEPELNÉ VLASTNOSTI

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

Teplota, zvláště u polymerních materiálů, často ovlivňuje strukturní vlastnosti těchto materiálů. Mnohdy způsobuje změnu základních mechanických a deformačních vlastností jako je elasticita, pevnost, tažnost, tvrdost, trvalá deformace, nebo se mění optické či elektrické vlastnosti.

### 4.1. Měrné teplo

Měrné teplo  $c$  při teplotě  $t$  je množství tepla  $dQ$  v joulech, kterým se 1 kg dané hmoty ohřeje o 1 °C [2].

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

Vzhledem k tomu, že se měrné teplo mění s teplotou, uvádí se pro jaký rozsah teplot nebo teplotu naměřená hodnota platí. V oblasti plastických hmot, které si udržují určité procento vlhkosti je nutné vzorky nejdříve vysušit. U těch plastických hmot, které obsahují monomer nebo plnivo je nutné určit složení. Měření měrného tepla se provádí kalorimetricky. Kalorimetr je tepelně izolovaná nádoba, ve které zkoumané látce dodáme známé množství tepla  $dQ$ . Nedochozí-li při dodání tepla v kalorimetru k žádnému jinému ději (např. k fázovým přeměnám, chemickým reakcím apod.) než k oteplení zkoumané látky, můžeme pak měrné teplo vyjádřit ze vztahu (7).

Rovnice (7) odpovídá pouze ideálnímu případu, kdy veškeré teplo  $dQ$  přejde pouze na zkoumanou látku. Ve skutečnosti se vždy část tepla, které bylo dodáno do kalorimetru spotřebuje na ohřátí jeho součástí, např. nádoby, míchadla, teploměru apod. a část se také

odvede do prostředí obklopující kalorimetr, protože tepelná izolace kalorimetru nemůže být ideálně adiabatická.

Teplo spotřebované na ohřátí kalorimetru a jeho jednotlivých součástí vystihneme, zavedeme-li do kalorimetrických výpočtů tepelnou kapacitu kalorimetru. Tuto označujeme  $K$  ( $J.K^{-1}$ ).

Tepelná kapacita závisí na druhu látek z nichž se soustava skládá, na její hmotě a na podmínkách, ve kterých se nachází, předáváme-li její teplo. Pro přesná a spolehlivá měření tepelných kapacit jsou nejvýhodnější adiabatické kalorimetry. V nich je výměna tepla s okolím zmenšena na minimum snížením koeficientu přestupu tepla (např. vakuovým pláštěm) a udržováním velmi malého (nulového) teplotního rozdílu mezi vlastním kalorimetrem a okolím, které tvoří regulovaný adiabatický plášť. Přesnost a reprodukovatelnost měření závisí naměřeném systému a na teplotě měření. Kvalitní aparatury, používané v této oblasti, měří v optimálním případě s přesností až  $\pm 0,05\%$  [3].

Měrné teplo se potom vyjádří ze vztahu:

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dt} - \frac{K}{m} \quad (8)$$

Pokud jde o tepelné ztráty, snažíme se v každém případě, aby byly co nejmenší. Z tohoto důvodu se volí počáteční teplota kalorimetru tak, aby se jeho teploty průběhu měření měnila souměrně kolem teploty místnosti. Pak se ztracené teplo přibližně vyrovná s teplem získaným a oprava na ztráty se nedělá. Jestliže tato podmínka není dosti přesně splněna, nebo trvá-li měření měrného tepla delší dobu, je nutné tepelné ztráty uvažovat a získané experimentální výsledky vhodným způsobem korigovat.

## 4.2. Teplotní vodivost

Polymerní materiály jsou dobrými tepelnými izolanty. Stanovení teplotní vodivosti tudíž slouží k jejich porovnání a především ke správné volbě jejich aplikace.



Součinitel teplotní vodivosti  $a$  udává, jak rychle se vyrovná teplotní rozdíl na dvou protilehlých stěnách krychle o hraně 1 m. Je definován jako poměr tepelné vodivosti k měrnému teplu vztáženému na jednotku objemu [4].

Teplotní vodivost se zjistí buď uvedeným výpočtem z tepelné vodivosti  $\lambda$ , měrného tepla  $c_p$  a hustoty  $\rho$  měřené látky nebo měřením na přístroji Pykově-Stahlanově. Podstatou této metody je zjištění doby, za kterou se projeví určitá teplota ( $50^\circ\text{C}$ ) na horní ploše zkušební destičky, položené na hladinu rtuťové lázně  $100^\circ\text{C}$  teplé. Zkušební tělesa mají v průměru 50 mm a tloušťku 7-10 mm. Stěny těles musí být hladké a rovnoběžné (u keramických látek jsou obroušeny). Měření teploty se provádí pomocí termočlánku. Destička opatřená termočlánkem se položí na hladinu rtuti vyhřáté na  $100^\circ\text{C}$  a zjistí se čas, za který teplota odvrácené plochy zkušebního tělesa dosáhne  $50^\circ\text{C}$ . Okamžik, kdy teploty této hodnoty dosáhne se měří pomocí krystalu difenylaminu, protože tento má dobře definovaný bod tání  $54^\circ\text{C}$ . Pokud není stanoveno jinak, měří se 3 destičky téže látky [11].

Teplotní vodivost se pak vypočte podle vzorce:

$$a = C \cdot \frac{d}{t} \quad (9)$$

kde  $C$  je konstanta přístroje

$\delta$  - tloušťka destičky

$\tau$  - čas

Teplotní vodivost se stanoví nejméně pětkrát a vypočte se průměr, který je pak střední teplotní vodivostí zkoušené látky v rozmezí teploty od  $20^\circ\text{C}$  do  $100^\circ\text{C}$ . Konstanta přístroje  $C$  se určí pokusem se zkušební destičkou z nerostné látky, jejíž střední teplotní vodivost je známá (např. Sádra nebo sklo).

Podle novější metody se součinitel teplotní vodivosti stanovuje tzv. Metodou  $a$  – kalorimetru v regulárním režimu 1. druhu. Zkušební těleso vytemperované na určitou teplotu se přemístí do temperační lázně jiné teploty (měrné temperační lázně) a

vyhodnocuje se průběh změny teploty středu zkušební tělesa. Po dosažení poloviny celkové změny je možné považovat logaritmus rozdílu teploty okamžité a ustálené na konci pokusu za lineární funkci času (toto stadium označujeme za regulární stav 1. druhu).

Pro provedení zkoušky je nutné určité přístrojové vybavení. Toto vybavení zahrnuje dva kapalinové termostaty, diferenciální termočlánek, jehož jeden spoj je ve středu zkušební tělesa a druhý v měrné temperanční lázni. Tento druhý kontakt je obvykle zhotovený z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. Tímto materiálem může být železo a konstantan. Mezi další přístroje patří lineární zapisovač s možností lineárního posuvu registračního papíru a mikrometr.

Při zkoušce se zkušební těleso včetně termočlánu vloží do termostatu pro vytemperování před měřením do ustálení teploty. Pak zkušební těleso přeneseme co nejrychleji do měrné temperanční lázně a současně se zapne registrace spuštěním posuvu registračního papíru zapisovače. Zápis se ukončí po vyrovnání teplot zkušební tělesa a měrné temperanční lázně, kterému odpovídá ustálená minimální výchylka zapisovače.

Hodnota výchylky zapisovače se udává v libovolných jednotkách. Ze záznamu se odečte hodnota  $x_0$ , odpovídající ustálenému stavu na konci pokusu a také hodnoty  $x_t$  příslušející časům  $\tau$ . Z těchto hodnot se stanoví regresní analýzou směrnice  $b$  ( $s^{-1}$ ) přímkové závislosti dané vztahem:

$$\log(x_t - x_0) = u + b \cdot \tau \quad (10)$$

Teplotní vodivost se stanoví ze směrnice a konstanty  $K_2$  závislé na tvaru a rozměrech zkušební tělesa.

$$a = K_2 \cdot b \quad (11)$$

Měření touto metodou se provádí za předpokladu, že teplotní vodivost hodnoceného materiálu je ve zvoleném rozsahu teplot konstantní. Stanovení teplotní vodivosti touto metodou nelze provádět při velkých odchylkách od tohoto předpokladu (např. při teplotách blízkých se bodu tání). V oblastech, kde je teplotní závislost teplotní vodivosti dosti výrazná, je vhodné volit menší interval teplot mezi lázněmi [11].

### 4.3. Tepelná vodivost

Izolační schopnost materiálů je nejjednodušeji charakterizována konstantou-tepelnou vodivostí  $\lambda$ . Tepelná vodivost  $\lambda$  je fyzikálním parametrem látky, který závisí na chemickém složení, vlhkosti, tlaku, teplotě a také hustotě zkoumané látky. Tepelná vodivost je tedy intenzita tepelného toku  $q$  dělená gradientem teploty. Tato skutečnost platí pro homogenní izotropní látky.

Intenzita ustáleného tepelného toku je množství tepla prošlého za jednotkový čas  $\tau$  jednotkovou plochou  $F$  kolmou ke směru toku:

$$q = \frac{Q}{F \cdot t} \quad (12)$$

Gradient teploty je pokles teploty na malé délce  $dl$  ve směru tepelného toku, vztažený na jednotku tloušťky.

$$q = -\lambda \text{ grad}T \quad (13)$$

Tepelná vodivost hmoty, jakožto její schopnost vést teplo, udává množství tepla ve  $W$ , které projde při ustáleném stavu zkoušenou deskou jednotkové plochy a tloušťky za 1 s při teplotním gradientu  $1K \cdot m^{-1}$ .

Již z tohoto vztahu plyne, že ztráty tepla vedením jsou tím větší, čím menší je tloušťka a čím větší je tepelná vodivost daného materiálu při stejném teplotním gradientu. Z ekonomického i technického hlediska je výhodné používat materiálů, které mají velkou tloušťku. Tloušťka materiálu je většinou dána již celkovou konstrukcí, a proto směrodatnou hodnotou pro minimum tepelných ztrát je tepelná vodivost.

Veškeré heterogenní příměsi mohou tepelnou vodivost značně změnit. Největší vliv má vzduch. Porézní materiály mají vodivost vždy podstatně menší než materiály hutné. Vyplývá to z nízké hodnoty tepelné vodivosti vzduchu. Proto izolační materiály jsou obvykle porézní. Tepelná vodivost se na základě molekulárně kinetické teorie vysvětluje

jako šíření tepelných vln. U polymerů prochází tepelné vlny střídavě oblastmi s dobrými a se špatnými podmínkami šíření. U krystalických materiálů tepelné vlny způsobují vibraci prostorových mřížek. V případě čistě amorfních materiálů jsou podmínky šíření tepelných vln daleko horší. Tepelné vlny jsou vlivem vnitřní nepravidelné struktury silně rozptylovány a také odráženy. Cizí látky v polymeru, které v tomto případě působí jako přídavná rozptylová centra, tepelnou vodivost u polymerů snižují. Z tohoto důvodu mají krystalické polymery tepelnou vodivost větší než polymery amorfní [11].

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

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b (t - t_0)] \quad (14)$$

kde  $\lambda_0$  – součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $t_0$

$b$  – konstanta, která se určuje experimentálně

Tab. 1. Tepelné vodivosti různých materiálů  
(při teplotě 20°C)

Materiál	Tepelná vodivost (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
stříbro	418
měď	395
hliník	229
železo	73
žula	2,9 – 4,0
led	2,2
beton	1,5
voda	1,0
cihla	0,28 – 1,2
sklo	0,6 – 1,0
linoleum	0,19
polystyren	0,16
benzín	0,131
skelná vata	0,04
vzduch	0,024

## 5. METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

### 5.1. Stacionární metody měření tepelné vodivosti

Základní princip je při všech metodách stejný. Teplo přechází od povrchu vyhřívané desky, válce nebo koule izolační vrstvou k chladnějšímu povrchu, kde se odvádí. Při měření se pak zjišťuje tloušťka vzorku, obě povrchové teploty a množství tepla nejčastěji převodem elektrické energie spotřebované ve vyhřívacím zařízení. Na starších přístrojích se určovalo množství tepla z oteplení nebo ochlazení a množství přiváděné kapaliny.

Základní a nejdůležitější podmínkou pro měřicí metodu je předpoklad, že celé přiváděné teplo musí procházet zkušebním vzorkem při ustáleném stavu a bez ztrát. Měřicí zařízení musí být proto konstruováno tak, aby se vyloučily boční ztráty odklonem tepla a aby byly zajištěny rovnoběžné tepelné proudnice.

Mezi metody a přístroje měření při ustáleném toku tepla patří tři hlavní typy, a to:

- deskové přístroje podle Poensgena a Bocka
- válcový přístroj Van Rinsuma
- kulový přístroj podle Nusselta [6]

#### 5.1.1. Deskový přístroj podle Poensgena

Tento přístroj je určen na měření tepelné vodivosti vzorků ve tvaru desek, a to jak z vláknitých tak sypkých materiálů. Mezi vyhřívanou a chlazenou deskou přístroje je vytvořené tepelné pole se souběžnými proudnicemi, které přechází kolmo zkoušenou deskou. Podstatou zkoušky je šíření tepelného toku a rozdílů povrchových teplot vzorků za ustáleného tepelného stavu. Ze zjištěných hodnot, měrné plochy a tloušťky zkoušeného vzorku se vypočítá součinitel tepelné vodivosti [6].

Vlastní přístroj je schematicky naznačen na obr. 3. Je složený z vyhřívané desky a dvou chladících desek. Výchřevná deska obsahuje elektrickou výchřevnou mřížku, oboustranně krytou elektricky izolačními deskami a povrchovými deskami z hliníkového nebo měděného plechu. Z obou dvou stran jsou na výchřevnou desku přiloženy zkušební izolační desky stejné jakosti a hlavně stejné tloušťky. Jejich rozměr kromě šířky je shodný s výchřevnou deskou.

Aby se odstranily vedlejší ztráty, výchřevná deska je ve stejné rovině obklopena prstencovitě kompenzační výchřevnou deskou s vlastní výchřevnou mřížkou, ohřívanou na stejnou teplotu jako výchřevná deska uvnitř. Na styku obou desek je nepatrná mezera.

Na vnějších plochách vzorků jsou uloženy dvě chladící desky, které jsou chlazené protékající vodou. Jejich půdorysné rozměry jsou shodné s vnějšími rozměry kompenzační desky. Volný prostor po obou stranách mezi kompenzačními a chladícími deskami je vyplněný buď stejným materiálem jako zkušební vzorek, nebo jiným izolačním vláknitým nebo sypkým materiálem.

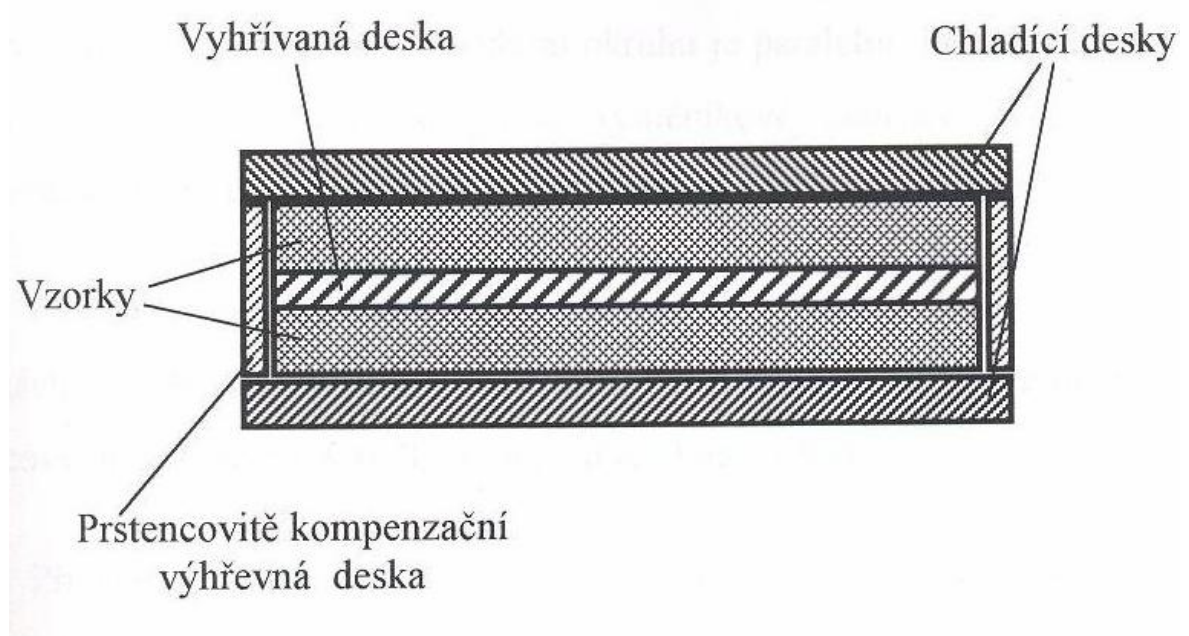
Celé měřicí deskové zařízení je uložené ve skříni a volný prostor je vyplněn izolační vlnou.

Výchřevný elektrický příkon se určuje ze sledovaných hodnot napětí a intenzity proudu. Vzájemné vyrovnání teplot výchřevné a kompenzační desky se sleduje termočláňkovým systémem.

Voda, která prochází chladícími deskami se uvádí do pohybu vodním čerpadlem. Zapojení desek ve vodním okruhu je paralelní. Požadovaná teplota vody se může nastavit zapojením výměňkové nádržky nebo použitím termostatu, který upraví vodu na požadovanou teplotu automaticky.

Povrchové teplo zkoušeného vzorku na výhřevné desce a chladících deskách se měří termočlánky. Na každé ploše je nejméně pět termočlánků s koncovými měděnými destičkami na teplém konci článku.

Při měření práškovitých a vláknitých izolantů je třeba uvedené měřicí zařízení doplnit tak, aby se materiály mohly přeměřovat při vhodných objemových hmotnostech apod. Proto se na spodní i horní stranu desky vkládá tenký dřevěný rám se stejným obvodem, jako má výhřevná deska. Takto vzniknutý prostor se pak vyplní vypočítaným a odváženým množstvím materiálu [7].



Obr. 1. Příklad přístroje podle Poensgena

### 5.1.2. Podobné deskové přístroje

Z principu Poensgenova přístroje byly odvozeny některé další deskové měřicí zařízení, přičemž základní způsob zůstal stejný, pouze uspořádání desek a vzorků se změnilo.

## A) Poensgenův jednostranný přístroj

Tento přístroj je podobný s původním, pouze místo dvou zkušebních desek se používá jen jednoho zkušebního tělesa.

Horní polovina výhřevné desky se nemění, ale místo spodního zkušebního vzorku je pod výhřevnou deskou uložena vhodná izolační deska a k ní ze spodní strany pomocná spodní výhřevná deska, která má zadržet tok tepla z měřicí výhřevné desky směrem dolů tak, aby všechno vyvinuté teplo přecházelo nahoru zkušebním vzorkem. Pomocná výhřevná deska se proto musí neustále regulovat na stejnou teplotu jako měřicí a kompenzační deska.

Teplotní spád je stanovený z rozdílu odměřených povrchových teplot, které se měří termočlánky.

Doplňkem tohoto přístroje může být Schmidtův měřič průtoku tepla.

## B) Cammererův přístroj

Tento přístroj je také založený na jednostranném toku tepla.

Na spodní výhřevné desce bez kompenzačního pásu je uložena zkušební deska a na ní Schmidtův měřič průtoku tepla. Povrchové teploty se opět měří termočlánky.

Toto uspořádání je vhodné pro teploty od 50°C do 150°C.

## C) Raischův přístroj



Tento deskový přístroj je přizpůsobený měření tepelné vodivosti při vyšších teplotách ve zkoušeném vzorku.

Chladicí desky původního Poensgenova přístroje jsou nahrazeny dalšími výhřevnými a kompenzačními deskami a další vrstvou izolačních desek. Tímto uspořádáním se mají dosáhnout vysoké teploty až do 1200°C [7].

### 5.1.3. Přístroj dr. Bocka

Princip přístroje je založený na Poensgenově metodě, tedy na kolmém průtoku tepla z výhřevné desky vrstvou zkoušeného vzorku k chladicí desce přístroje. Měření se provádí při ustáleném stavu a můžeme zkoušet také vláknité a sypké materiály [6]. Celá aparatura je účelně uspořádána ve formě laboratorního stolu a částečně automatizovaná, čímž je zjednodušené nastavování ustáleného stavu.

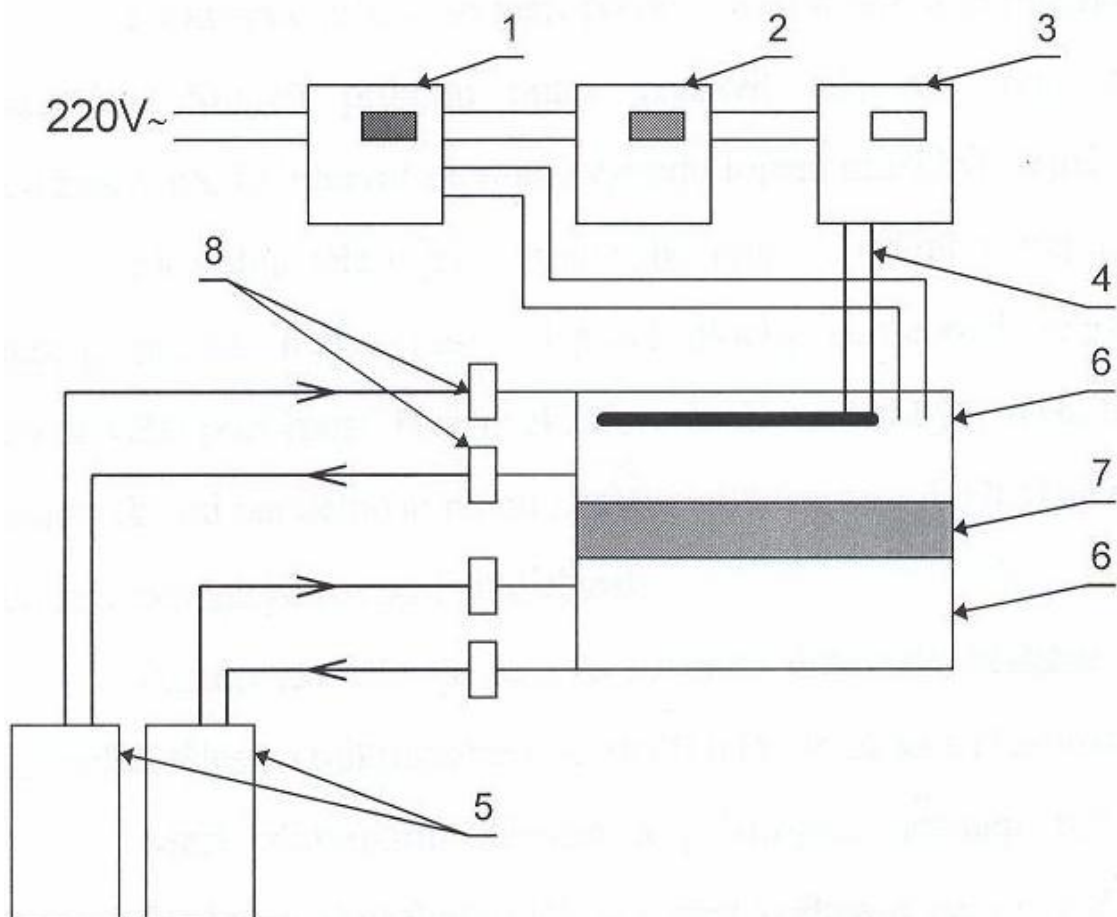
Jádrem přístroje je horní vytápění a dolní chlazená deska, mezi kterými je zkušební těleso. Vnitřní část tvoří vlastní měřicí výhřevná deska kruhového tvaru. Druhou část horní desky tvoří horní ochranná kompenzační výhřevná deska, která prstencově obklopuje měřicí desku a těsně k ní přiléhá, je však od ní tepelně izolována. Ochranná část horní desky je vyhřívána na konstantní teplotu kapalinou, která se ohřívá v termostatu.

Spodní chlazená deska přístroje se stejnými rozměry jako horní kompenzační deska se chladí na stálou teplotu protékající vodou. Teplota vody se udržuje na konstantní výši ultratermostatem.

Jádro měřicí soupravy je při měření zakryté izolovaným krytem. Za krytem je otočné rameno, které se používá na zavěšení celé horní výhřevné desky při zakládání do přístroje.

Měření elektrického příkonu spotřebovaného výhřevnou deskou se zaznamenává počítačem.

Celá měřicí souprava je ještě doplněna kontrolními a pomocnými prvky [7].



Obr. 2. Schéma přístroje dr. Bocka

- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| 1 – motorový kompenzátor | 5 - termostaty         |
| 2 – wattmetr             | 6 – topné desky        |
| 3 – přepínač výkonu      | 7 – zkušební deska     |
| 4 – topení               | 8 – odporové teploměry |

#### 5.1.4. Válcový přístroj podle van Rinsuma

Základní metoda vypracovaná van Rinsumem tkví v tom, že se izolační materiál upevní na zkušební elektricky vyhřívanou rourku. Na ní se měří elektrický příkon, odměřují se teploty na vyhřívané rource a na povrchu izolantu při ustáleném stavu a z těchto hodnot, jako i rozměrů izolantu se vypočítá součinitel tepelné vodivosti materiálu [6].

Základem přístroje je ocelová rourka, uvnitř které je uložena elektricky vyhřívaná spirála, izolovaná z obou stran elektrickou izolací.

Výhřevná spirála je napájena proudem se stabilizovaným napětím a příkon je regulován autotransfornátorem. Výhřevná rourka se po celé délce obalí izolačním materiálem. Na každé straně k výhřevné rource upevníme stejné ocelové rourky s vlastním vytápěním a regulací příkonu.

Povrchové teploty se měří termočlánky a to buď přímým výchylkovým měřením nebo kompenzačním měřením.

Tepelná vodivost se pak určuje zásadně pouze z hodnot naměřených v ustáleném stavu [7].

#### 5.1.5. Kulový přístroj podle Nusselta

Podstatou zkoušky je zjištění tepelné vodivosti sypkých a vláknitých materiálů zformovaných do mezikulové vrstvy výpočtem z hodnot jejich rozměrů, teplotního rozdílu vnějších povrchů obou koulí zkušebního zařízení a množství prostupujícího tepla za ustáleného tepelného stavu [6].

Nusseltův přístroj se skládá ze dvou soustředných koulí. Vnitřní koule má plášť z měděného plechu. Uvnitř je uloženo keramické tělísko s vloženou elektrickou vyhřevnou spirálou tak, aby vyvinuté teplo bylo pravidelně rozloženo po celém povrchu. Na povrchu pláště jsou v některých místech upevněny monočlásky na měření teploty vnitřního povrchu. Vnější kulový plášť je také z měděného plechu, ale je rozdělený. Horní polovina má příklop na plnění vnitřního mezikulového prostoru zkoušeným materiálem. Na vnějším povrchu pláště jsou opět pevně uloženy termočlásky na měření povrchové teploty.

Prostor mezi oběma koulemi se vyplní přesně odváženým a vypočítaným množstvím zkoušeného materiálu. Přitom se musí dbát zejména na rovnoměrné rozvrstvení izolace v celém prostoru. Teplo vyvinuté ve vnitřní vyhřívané kouli přestupuje beze ztrát zkoušeným izolantem až k vnějšímu plášti a odtud do okolí. Nevznikají zde tedy okrajové ztráty, proto se nemusí používat kompenzační zařízení [7].

Množství elektrické energie je podobně jako při předcházejících přístrojích určováno wattmetrem.

## **5.2. Nestacionární metody měření tepelné vodivosti**

Způsoby měření při neustáleném stavu jsou založeny na podobném principu jako ustálená měření, jsou však krátkodobé a vyžadují si zkušební tělesa s malými tloušťkami. Tyto okolnosti jsou příčinou určité nepřesnosti při nestacionárním měření, naproti tomu však rychlé neustálené měření umožňuje zkoušení vlhkých vzorků a určení vlivu vlhkosti na tepelnou vodivost apod. [8].

### 5.2.1. Fitchova metoda

Je to nejvíce používaná laboratorní metoda měření tepelné vodivosti při nestacionárních podmínkách.

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

Vlastní přístroj válcového typu je dvoudílný. V jeho spodní části je uprostřed uložen měděný váleček s přesně opracovanou horní plochou, která nepatrně přesahuje nad horní izolační desku spodní části přístroje. Uvnitř válečku je pevně uložený spoj termoelektrického článku, konec je vyvedený na svorky upevněné na plášti. Celý prostor okolo válečku je tepelně izolovaný proti ztrátám tepla do okolí.

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

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

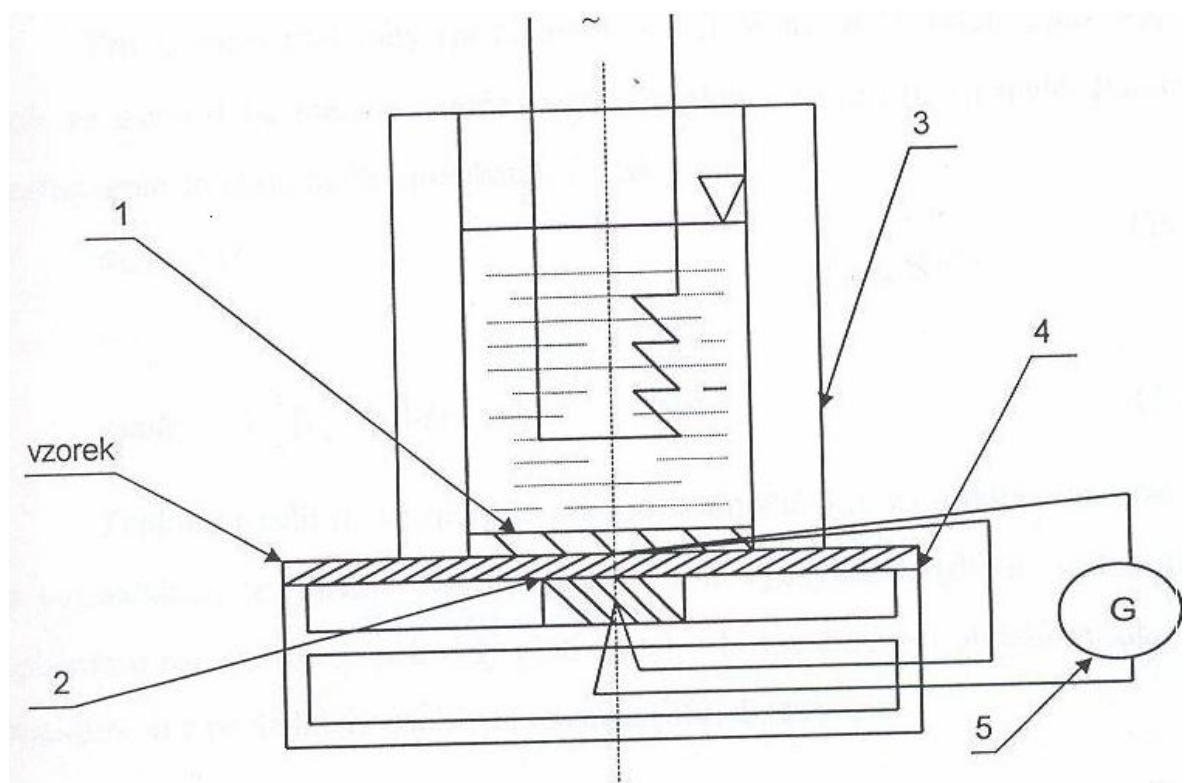
Před vlastním měřením tepelné vodivosti se zjistí doba náběhu k dosažení lineární závislosti změny rozdílu teplot na čase pro zkoušený materiál.

Po nastavení příslušného tlaku a po uplynutí doby náběhu zkoušky se zaznamená výchylka galvanometru (milivoltmetru) ( $p_1$ ) a po uplynutí 2 minut výchylka ( $p_2$ ). Ohřívací

nádoba se opět zvedne nahoru a po ochlazení prstence na teplotu prostředí a měrného válce na zjištěnou hodnotu je přístroj připraven k dalšímu měření [7].

Sypké a vláknité materiály se upravují do přístroje podobně jako při Poensgenově metodě. Použije se tenká obruč z folie nebo tvrdého papíru a její prostor se vyplní vypočítaným množstvím izolačního materiálu [9].

Vzhledem na malou tloušťku vzorku, na určité nepřesnosti termočlánekového měření, poměrně malé teplotní rozdíly a na ztráty tepla do okolí, je přesnost výsledků horší než při klasických metodách za ustáleného tepelného toku. Přesto se však tento přístroj používá zejména na měření vlhkých vzorků.



Obr. 3. Schéma Fitchova přístroje

1 - měděná deska

4 – krabice v níž je izolován měděný váleček

2 – měděný váleček

5 - galvanometr

3 – horní nádoba

### 5.2.2. Přístroj pvT 100

Na tomto přístroji lze měřit jednak tepelnou vodivost materiálů a jednak pvT charakteristiky materiálů.

Při měření tepelné vodivosti získáme data, která jsou velmi důležitá, např. semikrystalické materiály ukazují dramatickou změnu tepelné vodivosti v přechodovém prostoru, termosety (reaktoplasty) ukazují rozdíly mezi vulkanizovanou a nevulkanizovanou fází. Vyšší tlak zvyšuje tepelnou transportaci.

Množstevní data jsou zde nutné pro detailní charakteristiky materiálů, např. jsou používány jako vstup pro simulaci software vytlačovacího nebo vstřikovacího procesu [10].

Měření tepelné vodivosti na tomto přístroji je založeno na již dříve známých metodách měření. Při použití této techniky je tenká sonda zavedena přímo do vzorku, který je umístěn ve vyhřívaném měřícím válci. Součástí sondy je také termočlánek, který snímá teplotu uvnitř a na okraji vzorku, tj. teplotu měřícího válce snímají termočlánky umístěné přímo na válci. Pro jedno měření jsou nezbytné dvě speciální těsnění, která se používají k těsnění v jednom směru, tj. v ose válce.

Měření tepelné vodivosti je zcela kontrolováno počítačem. Měřené parametry (teplota a tlak) jsou vkládány do počítače, stejně jako další administrativní data, tj. informace o materiálu (hustota, název materiálu a hmotnost vzorku), údaje o obsluze stroje. Tato příprava je určována počítačem a poté prováděna automaticky bez jakéhokoli ovlivňování operátorem.

Všechny tyto doposud uvedené metody měření tepelné vodivosti jsou zastaralé, avšak časem prověřené a do dnešní doby používané metody.

## 6. NOVĚJŠÍ METODY MĚŘENÍ

Současným trendem jsou metody a přístroje, které jsou poměrně jednoduché, rychlé, přesné a samozřejmě počítačem vyhodnocované.

### 6.1. Přístroj ISOMET 2104

Multifunkční zařízení ISOMET 2104 je mikroprocesorem řízený přenosný přístroj pro přímé měření termo-fyzikálních vlastností (součinitele tepelné vodivosti, součinitele teplotní vodivosti a objemové měrné tepelné kapacity) pevných materiálů.

ISOMET 2104 používá nestacionární měřicí metodu, která redukuje dobu měření na 10 – 16 minut. ISOMET 2104 je vybaven vyměnitelnými sondami, jehlovou (pro sypké, porézní nebo vláknité materiály) a plošnou (pro pevné materiály). Každá sonda obsahuje zabudovanou paměť, ve které jsou uloženy její kalibrační konstanty.

Měření je založené na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou použity k výpočtu měřených veličin.

ISOMET umožňuje jednoduchou interaktivní komunikaci s uživatelem, optimalizuje podmínky měření z hlediska minimální spotřeby energie a doby měření. Má zabudovanou paměť pro 500 měření, je napájen buď akumulátorem (kapacita cca 5hodin) nebo síťovým adaptérem (7V-9V/500mA).



Rozsah pracovních teplot je od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Součinitel tepelné vodivosti dokáže měřit v rozsahu:

jehlová sonda :  $0,015 - 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

plošná sonda :  $0,015 - 5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

a objemovou měrnou tepelnou kapacitu v rozsahu:  $3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$

Přístroj ISOMET má široké použití:

- stavebnictví – výběr izolačních hmoty
  - geologie – venkovní měření přenosu tepla půd, písků, skal
  - dřevařský průmysl – měření vlhkosti a optimalizace procesu sušení dřeva
  - textilní průmysl – optimalizuje složení textilu, aby byl zachován teplotní komfort
- [13]

## 6.2. Metoda horkého drátu

Metoda horkého drátu je standardní nestacionární technika založená na měření teplotního nárůstu na definované vzdálenosti z lineárního zdroje tepla vloženého (horkého drátu) do testovaného materiálu. Jestliže zdroj tepla převzal konstantní a jednotný výstup podél délky zkušební vzorku, může být tepelná vodivost odvozena přímo od výsledné změny v teplotě přes známý časový interval. Sonda při této metodě obsahuje topný drát a tepelné čidlo. Tato sonda elektricky izoluje horký drát a tepelné čidlo od testovaného materiálu.

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

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi l} \cdot \ln \frac{4at}{r^2 C} \quad (15)$$

kde  $\lambda$  je tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $a$  je teplotní vodivost ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $C = \exp(\gamma)$ ,  $\gamma = 0,577\ 2157$  je Eulerova konstanta.

Rovnice (15) je platná jedině když je splněno  $r^2/4u < 1$ , tj. Pro dostatečně dlouhý čas  $t$  větší než určitý minimální čas  $t_{\min}$  a pro malou vzdálenost  $r$ .

Metoda horkého drátu může být aplikována v několika experimentálních modifikacích. Ve standardní křížové technice je kříž drátu zasazený v rýhách mezi dvěma stejně tříděnými vzorky. Kříž sestává z topného drátu a tepelného čidla. Horká plocha čidla je v přímém kontaktu s drátem topení.

V technice odporového topného drátu je drát také jako tepelné čidlo. V této metodě je teplota změřena změnou v odporu způsobeném ohřevem horkého drátu.

Tato metoda slouží k určení tepelné vodivosti pevných látek, prachů, písků a zrnitých materiálů.. Jsou dostupné tři měřicí techniky: standardní a křížová drátová technika, odpor - potenciální metoda olova.

Pevné vzorky pro tuto metodu sestávají ze dvou válcových polovin. Rozměry válce jsou obvykle: průměr 10 mm a výška do 100 mm. Písek, prach a zrnité materiály jsou obvykle dány do kostkovém kontejneru 100x100x100 mm [14].

### 6.3. Přístroj Thermophysical Transient Tester RT 1.02

Přístroj na měření specifického tepla, součinitele tepelné i teplotní vodivosti materiálů. Přístroj pracuje v rozsahu teplot od  $-40^{\circ}\text{C}$  až do  $+200^{\circ}\text{C}$  v izometrickém a neizometrickém režimu při ohřevu nebo chlazení rychlostí 0-2 K/min. na vzduchu, ve vakuu nebo v inertní atmosféře. Tvar vzorku je válec o průměru 10 až 30 mm a výšce do 45 mm nebo kvádr s rozměry od 10x10x40 až do 30x30x45 mm.

Přístroj je založený na pulzní metodě. Vzorek se nachází ve vytemperované komoře. Na vzorek je vyslán tepelný pulz, který vzorek ohřívá. Za vzorkem se nachází teplotní čidlo, které zaznamenává časovou tepelnou odezvu. Z této změny se mohou vypočítat dané termofyzikální vlastnosti. Na rozdíl od většiny používaných metod, dokáže tento přístroj měřit i nehomogenní materiály s možností použití termické analýzy v různých atmosférách.

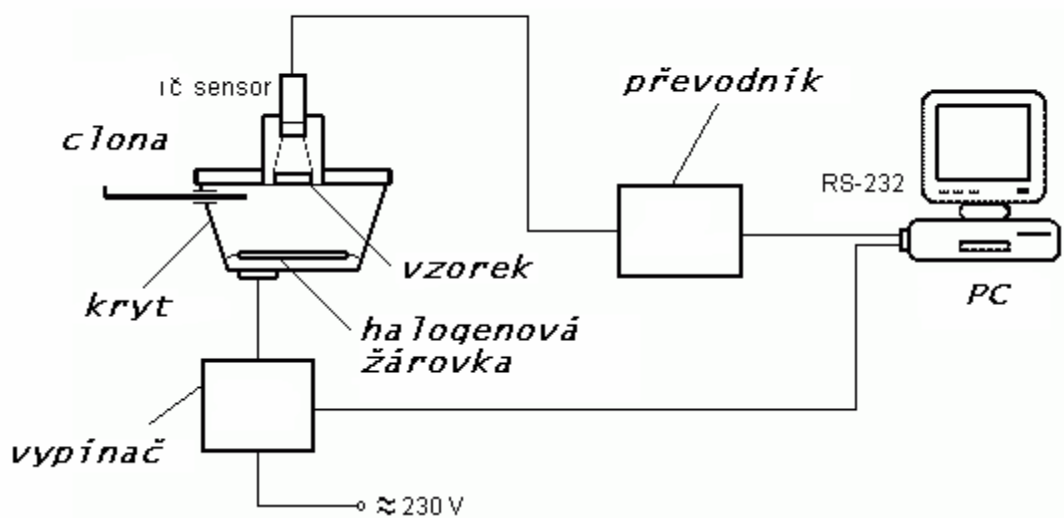
Přístroj je určený pro měření termofyzikálních vlastností materiálů jako např. skla, keramiky, kompozitů, polymerů, produktů práškové metalurgie a nebo monokrystalů.

Tento měřicí přístroj je k dispozici i ve zjednodušené variantě pro oblast pokojových teplot a bez možnosti změny okolní atmosféry [15].

### 6.4. Přístroj CFTT-05

Jedná se o bezkontaktní zábleskový měřicí přístroj. Měřené hodnoty aktuální teploty jsou snímány infračerveným snímačem umístěným z opačné strany než je dopadající záření na vzorek. Mezi halogenovou žárovkou a vzorkem je umístěná clona, kterou je možno zasouvat a vysouvat z důvodu nepříznivého ohřívání vzorku po skončení záblesku. Infračervený senzor je propojený s analogicko-digitálním převodníkem, který převádí spojitý průběh proudu / napětí na digitální signál a následně na komunikaci srozumitelnou pro RS-232 rozhraní osobního počítače. Výstupem z převodníku jsou hodnoty teplot ukládané do souboru, který je určený pro sběr údajů. Programem je také nastavitelná délka

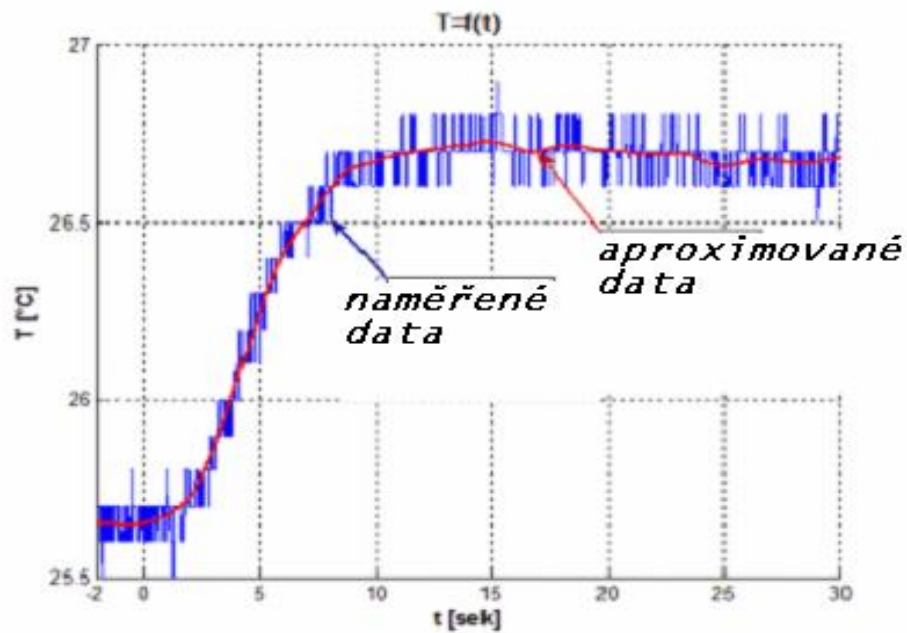
záblesku. Hodnoty teplot jsou zaznamenány rychlostí 64 krát za sekundu. Naměřené hodnoty jsou uloženy v textové podobě, kde v prvním sloupci je čas, ve kterém byla teplota naměřena a ve druhém je příslušná teplota. Hodnoty teplot jsou měřeny už 2 sekundy před zábleskem. Hodnoty teplot naměřené před zábleskem jsou důležité pro určení průměrné teploty před zábleskem.



Obr. 4: Schéma přístroje CFTT-05

Zkoumané vzorky musí mít tvar válečku o průměru 12 mm a výšce přibližně 2 mm.

Pro vyhodnocení naměřených hodnot se využívá program MATLAB. Průběh naměřených experimentálních hodnot teploty v závislosti na čase je znázorněn na následném obrázku:



Obr. 5: Vyhodnocení měření pomocí přístroje CFFT-05

Pro další zpracování a aplikaci vztahu:

$$\alpha = 1,38L^2/p^2 t_{1/2} \quad (16)$$

je potřebné daný experimentální průběh aproximovat z důvodu přítomnosti šumu. Na Obr.5 můžeme vidět vyhlazený průběh aproximací experimentálních hodnot. Na aproximaci je použita vyhlazovací metoda lowess v MATLABU. Po aproximaci je určena hodnota maxima a minima teplot na zadní straně vzorku a z těchto dvou hodnot se vypočítá hodnota  $t_{1/2}$ , ke které se následně dohledá příslušný čas, který se dosadí do rovnice (16) [16].

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce shrnuje základní teoretické znalosti ze sdílení tepla v tuhých látkách a měření tepelných parametrů. Jsou zde uvedeny principy stacionárního a nestacionárního vedení tepla v tuhých látkách.

Stacionární metody měření vedení tepla jsou náročné na měřicí zařízení, k používaným zařízením na měření tepelné vodivosti patří deskové přístroje podle Poensgena a Bocka, válcový přístroj Van Rinsuma a kulový přístroj podle Nusselta. Doba měření bývá u těchto přístrojů podstatně delší než u metod nestacionárních. Tato měření jsou velice přesná a jsou uváděna jako předpis ČSN.

Nestacionární metody měření vedení tepla jsou mj. reprezentovány přístrojem podle Fitcha, který je jednodušší a doba měření je podstatně kratší než u metod stacionárních. Přístroj se používá k měření tepelných vlastností plošných materiálů např. plastů a pryží. Nestacionárně se mohou měřit tepelná i teplotní vodivost, kterou lze měřit např. metodou horkého drátu používané mj. k měření sypkých hmot. K dalším používaným přístrojům patří univerzálnější zařízení Thermophysical Transient Tester RT 1.02, kterým je možno měřit kromě tepelné a teplotní vodivosti i měrné teplo.

K nejnovějším způsobům měření tepelných parametrů patří bezkontaktní metody, využívající IČ senzorů, jako u přístroje CFTT-05. Tyto způsoby měření jsou velice rychlé a jejich výsledky se v porovnání s klasickými metodami neliší o více jak 10%, jak uvádí dostupná literatura.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KOLOMAZNÍK, K., SEDLÁŘ, J., MACHÁČKOVÁ, A.: *Teorie technologických procesů III*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1978, 1.vydání, skriptum VUT.
- [2] RYBNÍKÁŘ, F., aj.: *Analýza a zkoušení plastických hmot*. SNTL, Praha 1965.
- [3] Kolektiv autorů: *Malá makromolekulární monografie*. Ústav makromolekulární chemie ČSAV, svazek 8, Praha 1971.
- [4] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*. VŠCHT Praha v Čs. Redakci VN MON, Praha 1988.
- [5] KOZÁKOVÁ, K.: *Tepelná vodivost kompozitů*. Diplomová práce, FT VUT, Zlín 2000, s. 20
- [6] HORÁK, Z.: *Praktická fyzika*. SNTL, Praha 1968.
- [7] KUNO, Z.: *Tepelné izolácie a meranie tepelných ztrát*. SNTL. Praha 1963.
- [8] LEONTOVIČ, D.: *Úvod do termodynamiky*. ČSAV, Praha 1957, 1.vydání.
- [9] ŠORIN, S. N.: *Sdílení tepla*. SNTL/ALFA, Praha, Bratislava 1968.
- [10] Manuál k přístroji pvT 100, SWO Polymertechnik GmbH.
- [11] BRZOBOHATÝ, P.: *Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů*. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, Zlín 2002, s. 15-18
- [12] MIKLAŠ, R.: *Tepelná vodivost kaučukových směsí*. Diplomová práce, FT VUT, Zlín 1998, s. 14-15
- [13] *Applied Precision Ltd.* [on line]. [cit. 2006-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.appliedp.sk/en/isomet.htm>>
- [14] *Thermophysical properties laboratory* [on line]. [cit. 2006-04-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.tpl.ukf.sk/engl\\_ vers/hot\\_wire.htm](http://www.tpl.ukf.sk/engl_ vers/hot_wire.htm)>
- [15] *Slovenská akadémia vied* [on line]. [cit. 2006-05-03]. Dostupný z WWW: <[http://www.sav.sk/index.php?lang=sk&charset=&doc=offers-results&work\\_total\\_no=12](http://www.sav.sk/index.php?lang=sk&charset=&doc=offers-results&work_total_no=12)>
- [16] *Fakulta průmyslových technologií v Púchově* [on line]. [cit. 2006-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://fpt.tnuni.sk/umtv/products.htm>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

a	Teplotní vodivost ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
b	Směrnice ( $\text{s}^{-1}$ )
C	Konstanta přístroje
c	Měrné teplo ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
E	Energie (W)
F	Jednotková plocha ( $\text{m}^2$ )
$\mathbf{i}$	Jednotkový vektor
$\mathbf{j}$	Jednotkový vektor
$\mathbf{k}$	Jednotkový vektor
L	Výška (m)
K	Tepelná kapacita kalorimetru ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$K_2$	Tepelná kapacita přístroje na stanovení teplotní vodivosti ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ )
m	Hmotnost (kg)
p	Tlak (Pa)
Q	Množství tepla (J)
q	Hustota tepelného toku ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
r	Poloměr (m)
T	Absolutní teplota (K)
$\Delta T$	Rozdíl teplot (K)
t	Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )
x	Souřadnice délky
Y	Souřadnice délky
z	Souřadnice délky
$\alpha$	Koeficient přestupu tepla ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )



---

$\gamma$	Eulerova konstanta
$\delta$	Tloušťka stěny (m)
$\lambda$	Tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$\rho$	Hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\tau$	Čas (s)
$\nabla$	Diferenciální operátor nabla

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Přístroj podle Poensgena.....	23
Obr. 2. Schéma přístroje dr. Bocka.....	26
Obr. 3. Schéma Fitchova přístroje.....	30
Obr. 4. Schéma přístroje CFTT - 05.....	36
Obr. 5. Vyhodnocení měření pomocí přístroje CFTT - 05.....	37

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Tepelné vodivosti různých materiálů (při teplotě 20°C).....	20
---	----

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Přístroj Thermophysical Transient Tester RT 1.02

# PŘÍLOHA P I: PŘÍSTROJ THERMOPHYSICAL TRANSIENT TESTER RT 1.02

Three thermophysical parameters within a single measurement  
 Thermal conductivity  
 Thermal diffusivity  
 Specific heat

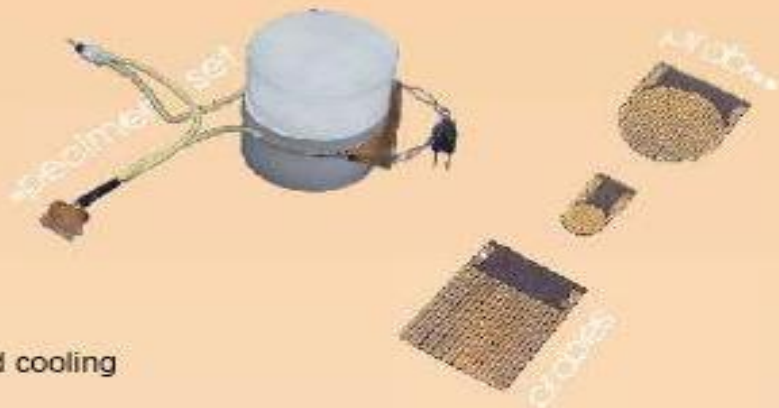


## Thermophysical Transient Tester Model RT 1.02

Temperature range:  
 -40°C up to 200 °C  
 -40°F up to 392 °F

Measuring conditions:  
 Vacuum  
 Air or inert atmosphere

Measuring regimes:  
 Isothermal  
 Nonisothermal  
 -programable heating and cooling



Range of the parameters and the measurement accuracy

Parameter	Range	Accuracy
Specific heat	150 – 3000 [J/ kg K]	1 – 3%
Thermal diffusivity	$10^{-8}$ - $10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /sec]	1 – 5%
Thermal conductivity	0.01 – 20 [W/m K]	2 – 8%



Department of Thermophysics  
 Institute of Physics SAS  
 Dúbravská cesta 9  
 845 11 Bratislava, Slovakia  
 Tel.: (+421) 7 59410576  
 Fax: (+421) 7 54776085  
 Email: mpolcar@savvo.sk