

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

# **MĚŘENÍ TEPLOT V MIKROVLNNÉM POLI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

MAREK URBAN



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro: **Marek Urban**

Program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor: 2301R000 bezoborový

Název tématu: **Měření teplot v mikrovlnném poli**

Title: **Temperature measurement in microwave field**

### *Zásady pro vypracování:*

Proveďte literární rešerši zaměřenou na způsoby měření teplot v mikrovlnném poli a na vhodné typy senzorů pracujících na základně odlišných fyzikálních principů. Porovnejte tyto senzory z hlediska přesnosti a rychlosti měření. Zaměřte se hlavně na aplikace ohřevu potravin v mikrovlnném poli v rozsahu teplot od 20 do 100 °C. Na základě kritické rešerše navrhnete vhodný sensor měření teploty pro konkrétní laboratorní zařízení mikrovlnné sušárny, která je součástí laboratorního vybavení univerzity. Navrhnete základní konstrukční uspořádání měřící aparatury pro tuto sušárnu. Zároveň uvažujte se souběžným měřením teploty uvnitř vzorku a úbytku vody ze vzorku.

- Cíle:
- 1) Kritická rešerše měření teploty v mikrovlnném poli.
  - 2) Návrh vhodného senzoru pro měření ve stávající mikrovlnné sušárně.
  - 3) Základní konstrukční řešení měření teploty a vlhkosti vzorku v sušárně.



*Rozsah grafických prací:* Basic design, sestava měřicí konstrukce

*Rozsah průvodní zprávy:* Úvod, teoretický úvod, kritická rešerše, popis zařízení, konstrukční návrh, diskuze, závěr, max. 30 stran

*Seznam odborné literatury:* dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše

*Vedoucí bakalářské práce:* Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

*Konzultant bakalářské práce:*

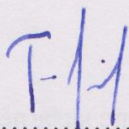
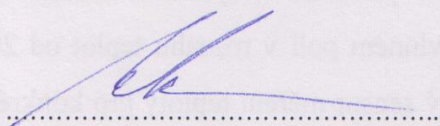
*Datum zadání bakalářské práce:* 25. dubna 2016

*Termín odevzdání bakalářské práce:* 10. června 2016

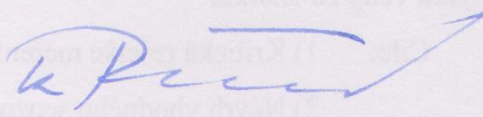
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

*Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne 21.4.2016



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
vedoucí ústavu



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
děkan fakulty

V Praze dne 19. dubna 2016

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením  
vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne 6. 6. 2016



Marek Urban

# Anotační list

**Jméno autora:** Marek

**Příjmení autora:** Urban

**Název práce česky:** Měření teplot v mikrovlnném poli

**Název práce anglicky:** Temperature measuring in microwave field

**Rozsah práce:**

- počet stran: 36
- počet obrázků: 12
- počet tabulek: 4
- počet příloh: 0

**Akademický rok:** 2015/2016

**Jazyk práce:** český

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** Teoretický základ strojího inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

**Oponent:** Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.

**Konzultant práce:**

**Zadavatel:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky, FS ČVUT

**Anotace česky:** Tato bakalářská práce na základě literární rešerše porovnává a vybírá vhodnou metodu pro měření teploty v mikrovlnném poli. Zvolená metoda měří s dostatečnou přesností teploty v rozmezí 20 až 100 °C. Vedlejším úkolem této bakalářské práce je najít konstrukční řešení pro mikrovlnnou sušárnu ve školních laboratořích, které zároveň měří úbytek hmotnosti v měřeném vzorku.

**Anotace anglicky:** This bachelor's thesis deals with examination of temperature measuring in microwave field. Main target of this work is to find optimal measuring device, which measures in temperature range from 20 to 100 °C with good accuracy. The second task is to create construction for selected device, where the sample will be placed and which allows its locations on scale to measure weight decrease during the microwave processing.

**Klíčová slova:** měření, teplota, mikrovlnná trouba, mikrovlnný ohřev

**Klíčová slova anglicky:** measuring, temperature, microwave oven, microwave heating

**Využití:** Pro mikrovlnnou sušárnu umístěnou v laboratořích s cílem pozdějšího praktického využití v průmyslové výrobě.

# OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. TEORIE.....	11
2.1 Magnetron a jeho vývoj.....	11
2.2 Mikrovlnny.....	13
2.3 Dielektrický a mikrovlnný ohřev.....	14
3. REŠERŠE.....	15
3.1 Úvod.....	15
3.2 Měřicí metody .....	15
3.2.1 Teploměr rtuťový.....	15
3.2.2 Termočlánek.....	15
3.2.3 Optická sonda.....	16
3.2.4 Infračervené záření – měření bezdotykové.....	16
3.2.5 Braggovská mřížka.....	17
3.3 Zahraněční články.....	18
3.3.1 Praktický termočlánek pro měření teploty v mikrovlnných troubách.....	18
3.3.2 Měření teplot při mikrovlnném ohřevu: Vliv Termočlánekového efektu.....	19
3.3.3 Snímání teploty mikrovlnného ohřevu betonu použitím Braggovy mřížky.....	21
3.3.4 Přesnost a reprodukovatelnost měření pevných pevných materiálů v mikrovlnném poli za použití optické sondy a infračerveného záření.....	21
3.3.5 Zpracovávání jídel.....	23
3.4 Vliv nehomogenních objektů.....	23
3.5 Rozložení tepla.....	24
4 ZHODNOCENÍ .....	26
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	28
5.1 Volba řešení.....	28
5.2 Postup montáže.....	30

6	ZÁVĚR.....	32
7	SEZNAMY.....	28
	7.1 Seznam obrázků.....	33
	7.2 Seznam tabulek.....	33
	7.3 Seznam rovnic.....	33
8	POUŽITÁ LITERATURA.....	34



## Slovo autora

Při vybírání tématu bakalářské práce jsem byl obezřetný, abych si vybral téma, které mě zajímá a bude řešit problém technického charakteru, kterému nerozumím a rozumět bych chtěl.

Mezi mnoha tématy jsem viděl řadu zajímavých zadání, ale při pohledu na „Měření teplot v mikrovlnném poli“ jsem si ihned vzpomněl, jak jsem ve svých sedmi letech měřil teplotu v mikrovlnném poli.

Tehdy to skončilo výpraskem a rozbitým rtuťovým teploměrem, který měl stupnici jen do 42° C, z čehož jsem usoudil, že měření tímto způsobem není vhodné. Ale byl to v té době jediný pro mě známý způsob měření teplot, a proto jsem použil tuto metodu.

Od té doby, uteklo mnoho času, ale daný problém mě dohonil, a já se ho s nově nabytými znalostmi, které jsem získal za více než dva roky studia na nejlepší České strojní fakultě, rozhodl vyřešit. Doufám, že jsem ve Vás vzbudil zvědavost. Přeji příjemné čtení.

# 1. ÚVOD

Mikrovlnný ohřev je relativně mladý způsob ohřevu a dodnes nejsou plně známy všechny možnosti této technologie. Největší výhodou mikrovlnného ohřevu je, s jakou rychlostí k ohřevu dochází. Jednou z možností využití mikrovlnného ohřevu je sušení a tím bych se rád v této práci zabýval. Mým úkolem je navrhnout, jak se mění obsah vody v měřeném vzorku.

Dále najít a porovnat různé typy měření teplot v mikrovlnném poli. Mým cílem je najít metodu, která zaručuje měření teploty přímo v měřeném objektu a ne jen povrchovou teplotu, která se měří snadněji. Tato práce má na základě rešerše vybrat vhodný způsob měření tepla, úbytku vody a navrhnout vhodné konstrukční řešení měřícího zařízení.

## 2. TEORIE

### 2.1 Magnetron a vývoj mikrovlnné trouby

Druhá světová válka, kromě 60 milionů lidských obětí přinesla mnoho technických inovací a vědeckých vynálezů, které přispěly k vývoji i po konci tohoto černého období 20. století. Jedním z nich byl i radar, který používalo britské letectvo, a který se snažilo nacistické Německo marně zkonstruovat, zatím co jeho autor, August Žáček, seděl v jimi okupované Praze. [12]

Po válce se pro tyto vynálezy hledalo další uplatnění a netrvalo dlouho a Američané sestavili první vysokofrekvenční magnetron, určený pro mikrovlnný ohřev. Největší problém byla velikost magnetronu. V té době nikdo z tvůrců nečekal, jaký úspěch bude tento výzkum mít, a kolik domácností bude v 21. století vlastnit mikrovlnnou troubu.

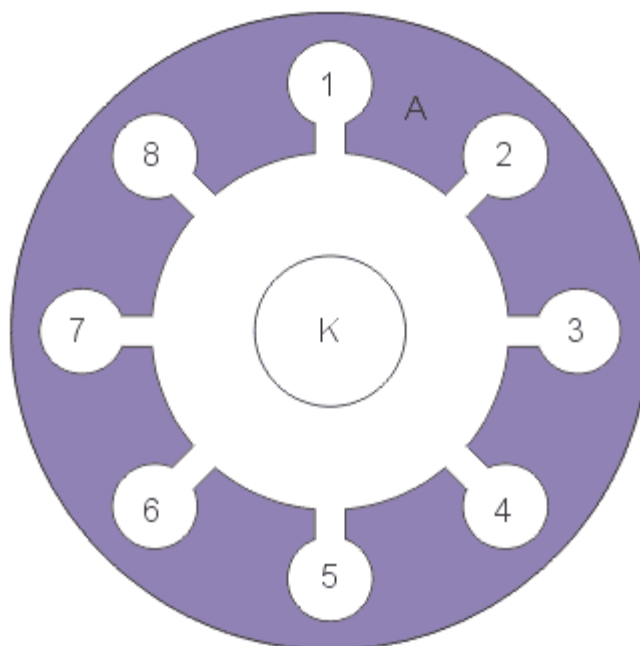


Obr. 1: Magnetron používaný v mikrovlnných troubách [13]

Velký skok ve vývoji magnetronu proběhl v 70. a 80. letech 20. století v Japonsku, [13] kde se povedlo magnetron přiblížit na rozměry dnes již používaných v domácnostech. Tehdy se začaly prodávat první mikrovlnné trouby pro domácnosti, avšak jejich cena, pohybující se okolo jednoho tisíce dolarů, byla pro většinu domácností nedostupná. Nicméně fakt, že si mikrovlnná trouba vybojuje své místo v kuchyňské lince, bylo jen otázkou času.

Magnetron je symetrická, válcová dioda, která emituje elektrony. Uprostřed se nachází katoda a okolo ní se otáčí anoda, která je opatřena sudým počtem dutinových

rezonátorů. Otáčením anody kolem statické katody se vytváří silné, vysokofrekvenční kmity, které jsou vlnovodem odváděny do mikrovlnné trouby [13].



Obr. 2: Řez magnetronem [13]

Dnes se mikrovlnné trouby nachází prakticky v každé domácnosti. V nejvyspělejších zemích bychom našli mikrovlnnou troubu v 95 % domácností a podle výzkumu ji denně používá 83%. Absolutně největší výhodou, kterou vnímají uživatelé mikrovlnných trub je krátká doba ohřevu pokrmů. [13]

Mnoho odpůrců magnetronu si myslí, že vlny, které se generují v mikrovlnné troubě, jsou škodlivé pro tělo a že degradují jídlo a ničí vitamíny v něm. Přesto, že se tyto spekulace nepodařilo a pravděpodobně nikdy nepodaří vyvrátit, dochází při mikrovlnném ohřívání především k rozkmitání molekul vody a mastných kyselin, které jsou ovlivňovány danou frekvencí nejvíce. Tímto způsobem dochází k celkovému ohřevu, který je srovnatelný s ohříváním konvenčními způsoby.

Mnoho rodin v Česku nepoužívá mikrovlnnou troubu z jednoho prostého důvodu – bojí se o své zdraví. [14] Především pak ionizujícího či radioaktivního záření. Někteří pak zase tvrdí, že mikrovlnná trouba ničí vitamíny v jídle a jídlo z mikrovlnné trouby chutná hůř, než to z konvenční trouby. Žádná ze studií neprokázala úbytek vitamínů v jídle vařeném v mikrovlnné troubě v porovnání s tím, které bylo vařeno v klasické troubě. Nebezpečné záření můžeme považovat za mnohem větší fámou, protože se jedná o neionizující záření, které má jiné vlastnosti než například rentgenové záření. Většina výrobců mikrovlnných trub

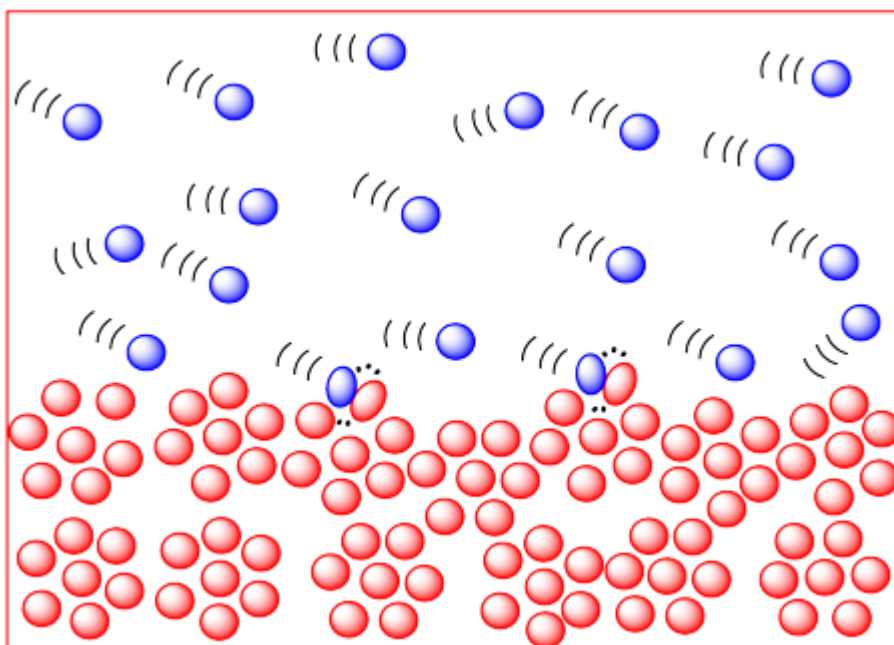
podrobuje své výrobky nezávislým testům, a žádný výrobek v těchto testech neměl byt jen sebemenší škodlivý vliv na jídlo. [14]

Pro měření teploty v mikrovlnném poli nelze použít standartní měřicí přístroje. Často používaný senzor termočlánek nelze použít, protože vyvolává zkraty, které jsou velmi nežádoucí. Tomu však lze vhodným odstíněním tohoto typu měřicího přístroje zabránit.

Nebezpečí však vzniká při přímém kontaktu s mikrovlnným zářením, jelikož se jedná o neviditelné záření a může být nebezpečné především, pokud přijde do kontaktu s lidskou tkání. Nejhůře působí na oči, kdy jedinec již po krátké době působení přichází o zrak.

## 2.2 Mikrovlny

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o frekvenci 300 MHz až 300 GHz a vlnové délce 1 mm až 1 m. V praktickém využití se však nejčastěji setkáváme s elektromagnetickými vlnami o frekvenci 2,45 GHz, které nejúčinněji rozkmitávají molekuly vody a mastných kyselin a které nejlépe absorbují mikrovlnnou energii a přeměňují ji v teplo. Dochází k polarizování nepolárních molekul vody, které se snaží posouvat ve směru elektrického pole. Díky vysoké frekvenci dochází k tomuto jevu milionkrát za sekundu a způsobuje vnitřní reakce molekul a celkové zahřívání materiálu.



Obr. 3: Vznik teploty třením molekul [14]

## 2.3 Dielektrický a mikrovlnný ohřev

Jedná se o disipaci polární energie, která vibruje ve střídavém elektromagnetickém poli a je alternativou odporového ohřevu. Toto vibrování působí především na silně polární látky, jako například vodu, a málo na nepolární, například porcelán. V tabulce 1 nalezneme penetrační hloubku některých potravin. Z hodnot uvedených v tabulce bych rád upozornil na vodu, která má velkou penetrační hloubku a proto se většinou zahřívá rychleji než jiné materiály. [22]

Tab. 1: Penetrační hloubka potravin

Látka	F [MHz]	$\varepsilon^0$	$\varepsilon''$	$1/k''$ [m]
Šunka 50 °C	2800	66.6	47.0	0.0062
Masová omáčka 40 °C	2800	76.1	24.1	0.0125
Bramborová kaše 40 °C	2800	60.6	17.4	0.0153
Syrové brambory 40 °C	2800	57.3	15.7	0.0155
Hovězí vařené 40 °C	2800	44.1	11.3	0.0202
Ananas 50 °C	2800	62	11	0.0245
Voda 40 °C	2800	72.8	6.5	0.0448

Tepelný výkon spadá na vrub téměř výhradně elektrické složce elektromagnetického pole a jeho hustotu  $Q$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) lze stanovit ze vztahu který vyplývá z Maxwellových rovnic

$$\dot{Q} = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2, \quad (1)$$

kde  $f$  [Hz] je frekvence elektromagnetických vln,  $E$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] je amplituda intenzity elektrického pole,  $\varepsilon_0 = 8,8543 \cdot 10^{-12}$  [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ] je permitivita vakua a  $\varepsilon''$  [-] je ztrátový faktor ohřivaného dielektrika. Nejjednodušší realizací dielektrika je kondenzátor.

Pro velmi krátké časy lze zanedbat vedení tepla, a určit tak rychlost ohřevu

$$T(t, x) = T_0 + \frac{Q(x)t}{\rho c_p} \quad (2)$$

a pokud budeme brát malé vzorky a budeme je vystavovat krátkým časovým úsekům, můžeme počítat s lineárním nárůstem teploty. [21]



## 3. REŠERŠE

### 3.1 Úvod

Obsahem rešeršní části této bakalářské práce je kritické zhodnocení měřících metod, které již byly použity pro měření teplot v mikrovlnném poli. Vzhledem k nedostatku literárních zdrojů v českém jazyce jsem čerpal především z anglických zdrojů.

### 3.2 Měřící metody

#### 3.2.1 Teploměr rtuťový

Pro měření lidské pokožky nebo okolní teploty se nejčastěji používá teploměr, který je založen na principu roztažnosti kapaliny v závislosti na teplotě. Dlouhou dobu byl nejpoužívanějším teploměrem teploměr rtuťový, ale zákony zakázaly jeho volný prodej a rtuťové teploměry byly nahrazeny teploměry lihovými nebo galiiovými.

Teploměr se skládá z jímky, ve které se nachází kapalina, kapiláry, kterou proudí kapalina při zvětšování svého objemu tepelnou roztažností a stupnice, ze které odečítáme výslednou teplotu. [15]

Tento způsob měření teplot je velmi oblíbený, protože se považuje za velmi spolehlivý, ale pro měření teploty se čím dál častěji používá elektrický, který čeká na ustálení teploty. To má velkou výhodu především pro rodiče, jejichž vynalézavé děti předstírají nemoc a často strkají teploměr do horkého hrnku, nebo jako já na rozsvícenou žárovku.

#### 3.2.2 Termočlánek

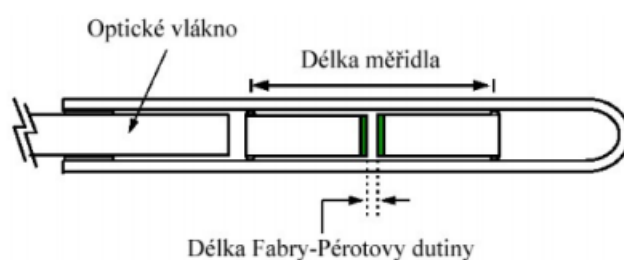
Jedním z velmi často používaných snímačů pro měření teploty je termočlánek, který pracuje na principu Seebeckova jevu, což je vznik termoelektrického napětí v obvodu tvořeném dvěma různými vodiči, jejichž spoje se nachází v prostředí o jiné teplotě. Mezi základní vlastnosti termočláneků patří rychlost měření a poměrně vysoká spolehlivost, která však závisí na správné kalibraci. [10]

Spoj měřícího konce termočláneků je tvořen mechanicky, nebo svařením a pájením. Velmi často tento spoj chrání plášť, aby nedošlo k jeho poškození. Vhodný typ termočláneků se volí s ohledem na prostředí, zejména dle předpokládané teploty. Další vlivy určují materiál použitého pláště. Zapojení termočláneků může být přímo do měřícího přístroje, ovšem často se měří na velké vzdálenosti, kde se používá kompenzační vedení. Teplota srovnávacího spoje se udržuje pomocí Dewarových nádob, nebo termostatem. Existují také

způsoby kompenzace jeho teploty pomocí dalšího termočlátku, nebo kompenzační krabice. Termočlátky jsou v praxi velmi rozšířeny, zejména ve strojírenském, chemickém a hutním průmyslu.

### 3.2.3 Optická sonda

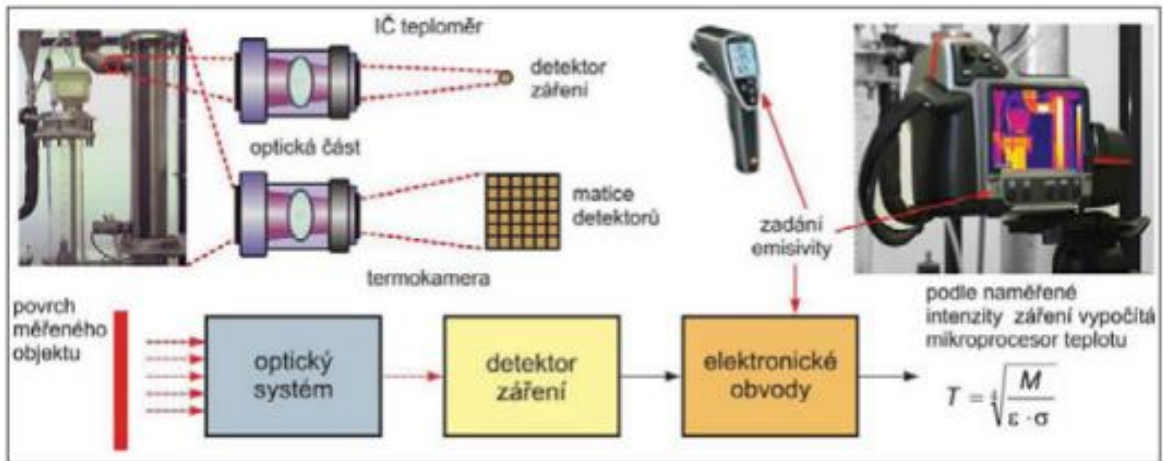
Současný dynamický rozvoj technologie optických vláken má úzkou souvislost s využitím optických součástí a zvláště optických vláken v oblasti telekomunikací. Ruku v ruce s tím probíhá rozvoj optických senzorů. Pro lokalizování deformací a snímání teploty jsou nejčastěji používány dva typy snímačů, které fungují na rozdílných principech. Jsou to vnitrovláknové Braggovy mřížky a interferometrické Fabry-Pérot snímače. Jejich multiplexní přenos a všestrannost vede k využití jejich vlastností pro mnohé aplikace. Interferometrické Fabry-Pérot senzory, se používají v mnoha konfiguracích, i když v praktickém využití se spíše preferují vnější Fabry-Pérot interferometry (EFPI) a interferometrické senzory s Braggovými mřížkami. Společným znakem pro tyto senzory je jejich složení ze dvou odrazecích zrcadel, které vytváří Fabry-Pérot dutinu. Princip interferometrických senzorů je založen na skládání dvou odrazů a následné změny intenzity v detektoru, kde měnící se funkce sinus představuje vzdálenost těchto dvou zrcadel. Délka je přímo ovlivněna deformací a teplotou. Zrcadla mohou být realizována povlakem odrazivého materiálu uvnitř vlákna, přímým rozštěpením konců vláken nebo vytvořením Braggových mřížek uvnitř optického vlákna. [16]



Obr. 4: Průřez Fabry-Pérotovým senzorem [16]

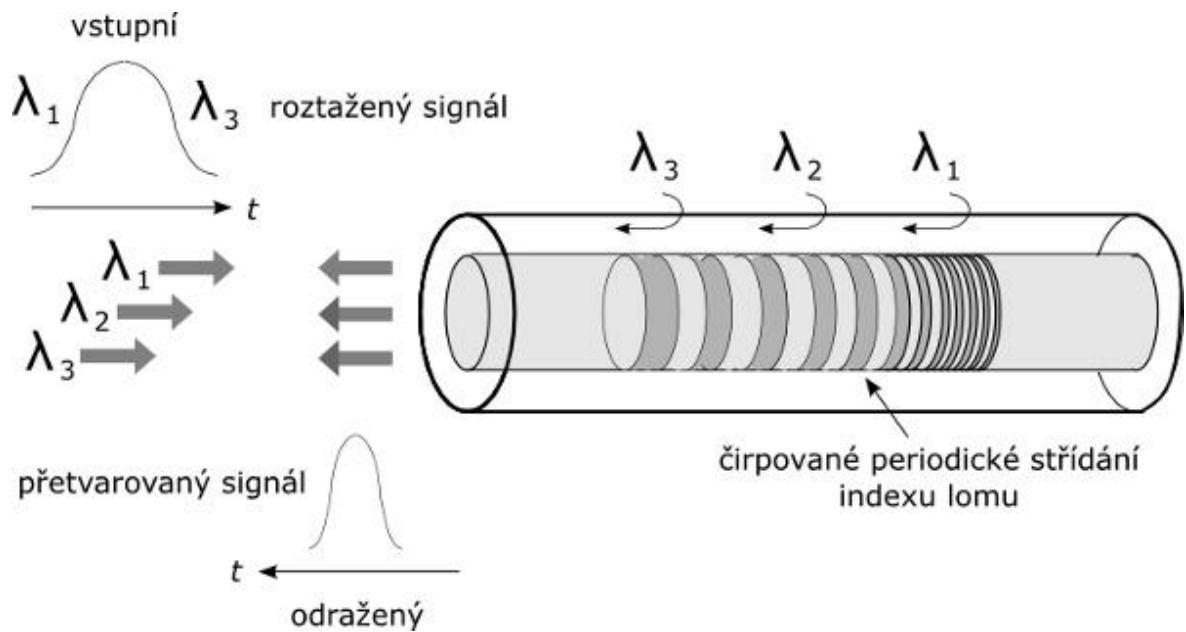
### 3.2.4 Infračervené záření – měření bezdotykové

Pyrometry a termokamery představují moderní a výkonnou měřicí techniku, která je využitelná pro termografii a termodiagnostiku v celé řadě průmyslových odvětví. Pro efektivní využití této techniky je třeba vycházet jednak ze znalostí principů bezdotykového měření teploty a jednak ze znalostí řady parametrů, které ovlivňují výsledek měření. Pro měření v mikrovlnné troubě je nejdůležitější parametr pro nastavení pyrometru emisivita vzorku.



Obr. 5: Blokové schéma pyrometru a termokamery [17]

### 3.2.5 Braggovská mřížka



Obr. 6: Schéma optické sondy [16]

Braggovskou mřížku si představuji jako trubici, která je mřížkováním rozdělena na několik segmentů s rozdílnou délkou. Tyto segmenty propouštějí světelné paprsky různých vlnových délek (Fresnelovy odrazy). V případě, že pošleme trubicí paprsek, víme, kde můžeme očekávat jeho výstup. V případě, že Braggovskou mřížku umístíme do mikrovlnného pole a začneme ji ohřívat, změníme vzdálenost mřížek a natáhneme segment tepelnou roztažností. Světelný paprsek o známé vlnové délce pak následně změní svou vlnovou délku (viz. Obr. 6).

Pro měření teploty není vhodné použít pouze jednu mřížku, jelikož Braggovská mřížka je náchylná i na deformace tlakem a další mřížky jsou kompenzační a korigují okolní vlivy.

## 3.3 Zahraniční články

### 3.3.1 Praktický termočlánek pro měření teploty v mikrovlnných troubách

F.R. van de Voort, M. Laureano, J. P. Smith, (1987). [11]

Tento článek z roku 1987 se zaměřuje na měření teploty v mikrovlnných troubách pomocí termočlánu. Autory navržený, speciálně upravený termočlánek má za úkol měřit teplotu, aniž by docházelo k výbojům způsobeným vlastností materiálu, ze kterého je termočlánek vyroben. Konkrétně se jedná o spletené drátky mědi a konstantanu - typ T.

Tento termočlánek byl odstíněn použitím povlaku niklu. Konec sondy o délce 4 cm je vyroben z dlouhé trubičky s tloušťkou stěny 0,365 mm. Jádro termočlánu bylo uzavřeno přibližně v posledních 3 mm trubičky a bylo upraveno v hladký zkosený konec. Termočlánek byl umístěn do mikrovlnné trouby MDS-81, která má pokryté stěny teflonem a je vhodná pro práci s nebezpečnými látkami, jako jsou například kyseliny. Z každé strany do ní byly navrtány otvory, aby bylo možné správně umístit sondu. Odstíněný termočlánek byl poté upevněn pomocí matic a z vnější strany byla přidána ochranná stěna.

Takto přizpůsobený termočlánek byl následně otestován při několika měřeních. Jako proměnné parametry zvolili nejdříve výkon mikrovlnné trouby a poté objem měřené kapaliny. Z grafů se zdá, že termočlánek měří správně, protože při zvýšení výkonu na dvojnásobek se voda ohřeje přibližně dvakrát rychleji na danou teplotu (v tomto případě 100 °C). To samé můžeme říci i o měření teploty v závislosti na objemu kapaliny, kde 100 ml vody se ohřálo na teplotu 100 °C za 1 minutu a 15 sekund a 300 ml se ohřálo při stejném nastavení na stejnou teplotu za 4 minuty. Díky teflonovému vnitřku mikrovlnné trouby se autoři rozhodli ohřívat 98% kyselinu sírovou, kterou ohřáli při 80% výkonu mikrovlnné trouby na 338 °C za 3 minuty. Jelikož se teplota 338 °C od teploty 340 °C moc neliší, dají se naměřené výsledky považovat za důvěryhodné.

Autoři se nebáli zajít ještě dál a měřit teplotu hamburgeru. Vzniklá křivka nebyla spojitá. Skok, který nastává kolem 90°C je způsoben přeměnou mastných kyselin a také ohřevem obsahu vody v hamburgeru.

Měření ukázalo, že rychlost ohřevu můžeme popsat kvadratickou rovnicí:

$$R = 0,1979 + 0,2967P + 0,0049P^2 \quad (3)$$

Kde P je nastavená výkon mikrovlnné trouby [W] a R je rychlost [s].

## **Závěr**

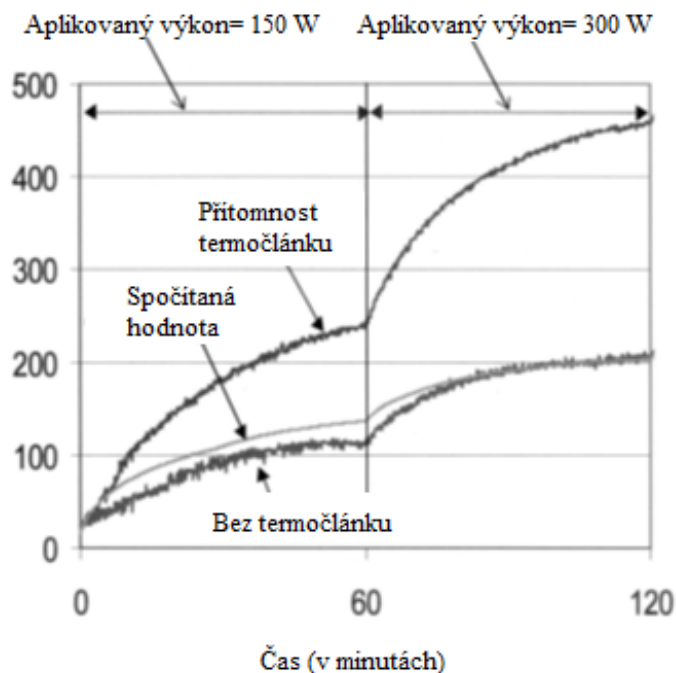
Článek popisuje výrobu odstíněného termočlásku a výsledky jeho měření. Při měření vzorků s vysokou teplotní vodivostí byla dosažena přesnost měření na  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Avšak při měření teplot materiálu s nízkou teplotní vodivostí, byly zjištěny chyby měření u špičky sondy. Nakonec autoři shledali termočlásek za vhodný prostředek měření teplot při vhodném přepočtu měření teploty termočlásku na skutečnou. Jako výhodu termočlásku vidí především jeho cenovou dostupnost a časté používání v mnoha laboratořích a jednoduchou úpravu za pomoci měděné sítě a hliníkového povlaku. V případě použití této koncepce bychom nejprve museli kalibrovat naměřené hodnoty použitím jiné metody měření (např. optickými vlákny) a ačkoliv budeme zahřívat vzorky jen krátkou dobu a na nízké teploty menší než  $100^\circ\text{C}$  považují upravený termočlásek pro měření teplot v potravinách za nevhodný způsob měření.

### **3.3.2 Měření teplot při mikrovlnném ohřevu: Vliv**

#### **Termočláskového efektu**

Evan Pert, Yuval Carmel, Amikam Birnboim, Tayo Olorunyolemi, David Gershon, Jeff Calame, Isabel K. Lloyd, and Otto C. Wilson Jr., (2001). [8]

Tato studie porovnává výsledky změřené pomocí termočlásku a pomocí pyrometru. V případě termočlásku získáme pouze jedno měření. Pyrometrem získáme pouze měření povrchu objektu. Při měření s termočláskem a bez něho získáváme rozdílné výsledky, které se značně liší. V případě, že měření trvá delší časový úsek, může rozdíl naměřených teplot při daném nastavení mikrovlnné trouby přesáhnout až 100%. A to mluvíme pouze o rozdílu teplot. Z těchto měření jasně vyplývá, že přítomnost termočlásku v měřeném objektu výrazně mění teplotu objektu. Z tohoto důvodu nemůžeme termočlásek použít pro měření teplot objektů, aniž bychom mohli opomenout korekce, která by eliminovala zvýšení teploty díky přítomnosti termočlásku. Kovový termočlásek je elektricky a termálně konduktivní a to zapříčiní značný nárůst teploty vzorku a je sám o sobě zdrojem tepla. Při použití velkého termočlásku v mikrovlnné troubě se nedostává těchto účinků, protože teplotní vodivost termočlásku je stejná jako měřené prostředí. Experimentálně byl tento efekt potvrzen měřením vzorku oxidu zinku, kde se teplota měřená termočláskem ustálila na  $1000^\circ\text{C}$  a teplota povrchu, měřena pyrometrem, dosáhla  $1160^\circ\text{C}$ .



Obr. 7: Měření teploty pomocí pyrometru s a bez termočláнку [8]

Dále byl proveden pokus, při kterém zkoumaný vzorek měřili pomocí termočláнку i pyrometru a následně pouze pomocí pyrometru. Výsledný rozdíl teplot byl markantní a dobře popisuje, jaký má vliv termočlánek na teplotu vzorku, viz obr. 6.

Vnitřní teplota vzorku, kde se nachází termočlánek, je větší, protože termočlánek se ohřívá mnohem rychleji a na mnohem větší teplotu. Přestupem tepla pak zvyšuje povrchovou teplotu vzorku.

## Závěr

Článek považuje termočlánek za nevhodný měřicí přístroj pro měření v mikrovlnném poli, především z důvodu jeho teplotního vlivu na měřený vzorek. Termočlánek může způsobit lokální zvýšení teploty měřeného předmětu. Obecně může zvýšit maximální teplotu vzorku a způsobit značné chyby při snímání teplot. Jako ideální měřicí metodu článek shledává bezkontaktní měřicí způsob pomocí pyrometru s teplotním rozmezím 25 – 2500 °C. Měření pomocí pyrometru bylo vyzkoušeno a porovnáno s charakteristikou chladnutí vzorku pomocí termočláнку, bez působení mikrovlnného pole. Tento měřicí systém shledali přesným pro měření teploty při zpracování keramik. Já však chci měřit kontaktním způsobem, v teplotním rozmezí 10 – 100 °C a proto pro tento projekt shledávám pyrometr i termočlánek za nevhodné měřicí způsoby. Proto považuji článek [11] za nedůvěryhodný, protože jejich data jsou v rozporu s těmi, které se nachází v tomto a v následujících článcích.



Odstíněním termočlánku sice získáme měřicí přístroj, který můžeme použít k měření teploty v mikrovlnném poli, ale musíme být velmi obezřetní při vyhodnocování naměřených dat.

### **3.3.3 Snímání teploty mikrovlnného ohřevu betonu použitím Braggovy mřížky**

Akbarnezhad, Kuang and Ong, (2011) [6]

Článek popisuje měření teploty betonu pomocí Braggovy mřížky. Termočlánek, který je nejčastěji používaný přístroj na měření teploty shledává nevhodný z několika důvodů. V roce 1995 a 1997 byl použit K typ termočlánku k měření teploty v mikrovlnném poli. Problém se nachází v jejich kovovém složení a to, že nejsou imunní vůči elektromagnetickému rušení a také mohou být nepřesné při měření v elektromagnetickém poli. Navíc přítomnost sondy v mikrovlnném prostředí může způsobit zkreslení rozložení elektromagnetického pole a může indukovat proudy, které ovlivňují elektroniku použitou k měření teplot. Přítomnost měřicí sondy může taktéž zapříčinit nepřesnosti, způsobené vlastním ohřevem, tepelnou vodivostí nebo soustředění teploty, především od špičky sondy.

Vlastnosti optických vláken umožnily vývoj nových, optických senzorů. Z výše uvedených důvodů byly vynalezeny optické senzory v relativně krátké době. Braggovská mřížka přilákala značnou pozornost jako vhodný kompromis mezi spolehlivým měřením teploty a snímačem deformací, a našla tak široké uplatnění v reálném životě. [6]

#### **Závěr**

Článek uznává za nevhodný termočlánek z důvodu nepřesnosti měření v mikrovlnném poli. Vyzdvihuje výhody optické sondy a její všestranné použití pro měření teplot. Velkou nevýhodou tak zůstává jejich cena a pomalá rychlost měření.

### **3.3.4 Přesnost a reprodukovatelnost měření pevných materiálů v mikrovlnném poli za použití optické sondy a infračerveného záření**

Tomasz Durka, Georgios Stefanidis, TomVan Gerven and

Andrzej Stankiewicz, (2010). [5]

Použití klasického termočlátku silně odrazuje rušení mezi elektromagnetickým polem a kovovou sondou, které potencionálně vede k jiskření. Jiskření termočlátku lze částečně odstranit odstíněním a uzemněním termočlátku, ale nemůžeme zaručit úplnou eliminaci termočlátkového efektu. (viz. 3.3.2) Někteří autoři se pokoušeli měřit teplotu za pomoci termočlátku bezprostředně po vypnutí magnetronu, ale pozdější experimenty ukázaly, že toto měření je značně odlišné a absolutně neodpovídá teplotám měřeným v mikrovlnném poli.

Nejoblíbenější a široce používanou metodou pro měření teplot v mikrovlnném poli je infračervený teploměr (IR), neboli pyrometr. Pro infračervené teploměry máme dvě hlavní techniky. První je použití infračervené kamery, umístěné mimo mikrovlnnou troubu a druhá je zabudování infračerveného senzoru do mikrovlnné trouby. Oba postupy mají své nevýhody, ale společnou nevýhodou těchto měření je, že měříme pouze povrch vzorku a ne vnitřní teploty. Hlavní nevýhodou, která ovlivňuje naměřenou teplotu je častá a nutná recalibrace, která závisí na vlastnostech měřeného povrchu i na okolním prostředí, ve kterém měříme. Jeden z pokusů taky ukázal, že při měření teploty materiálu s dobrou absorpcí, můžeme změřit vyšší teplotu, než je teplota tání materiálu, přestože se materiál stále nachází v pevném skupenství. Domnívám se, že to bylo ovlivněné především tím, že teplota povrchu byla vyšší než teplota jádra materiálu a přestup tepla ve vzorku zabraňoval přeměně v jiné skupenství. Toto měření také ukázalo, jak je těžké zajistit přesné měření teploty pomocí infrakamery. Na měření povrchové teploty se dá použít obal s velkou tepelnou vodivostí, ale nízkou vodivostí elektrickou (např. teflonová fólie), ve které bychom vzorek ohřívali, a měřili povrchovou teplotu pomocí IR teploměru. Tím by odpadl problém se stanovením emisivity vzorku a častou korekcí, která by jinak byla nezbytná.

Další, hodně rozšířená metoda pro měření teploty, je za pomoci optických sond. Měření za pomoci optických sond nezpůsobuje reakce na sondu u běžných materiálů, není zde potřeba recalibrace pro každé následující měření a můžeme s ní měřit teplotu v různých vzdálenostech od středu vzorku, až po povrch vzorku. Hlavní nebezpečí při práci s optickou sondou je mechanické poškození sondy způsobené nárazem. Pro správné měření s optickou sondou je výhodné opakovat měření vícekrát a získat tak přesný výsledek. [5]

## **Závěr**

Článek shledává optickou sondu daleko vhodnější pro měření teplot v mikrovlnném poli, než je termočlánek a následně ji srovnává s nevýhodami infračerveného (IR) teploměru.

Hlavní nevýhoda IR teploměru je ta, že neměří teplotu uvnitř vzorku, ale na povrchu. Hlavní nevýhoda optické sondy je především její náchylnost na mechanické rázy.

### 3.3.5 Zpracovávání jídel

S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, Tanmay Basak, (2013). [19]

Mikrovlnné trouby jsou úspěšně používány pro mnoho zpracovávání jídel, ať už to je vaření, sušení, pečení, rozmrazování nebo ohřívání. Článek pojednává především o různých způsobech zpracovávání a modelování mikrovlnného zahřívání. Mikrovlnné vaření je způsobeno přítomností tuku a vlhkostí vzorku. Výhodami mikrovlnného vaření jsou především v chuti jídla, kdy v jídle zůstává více vody než v elektrických troubách. Navíc bylo dokázáno, že mikrovlnné trouby jsou účinnější v odstraňování a zneškodnění patogenů a enzymů, důsledkem rychlého zvýšení tepla. Při modelování mikrovlnného zahřívání používáme Maxwellovy rovnice a Lambertův zákon, stejně jako rovnice pro přestup tepla a hmoty, které dobře popisují jevy v mikrovlnné troubě a používáme je k odhadu výsledné teploty. Přesto, že mikrovlnná energie má široké spektrum použití, je zde potřeba dalšího výzkumu, zaměřeného na zlepšení modelovacích metod [19].

Tyto modely by bylo možné použít pro stanovení fyzikálních parametrů vzorku nebo chyby měření teplotních sond při mikrovlnném ohřevu, porovnáním s experimentálními daty. Má práce je zaměřena na měření teplot při mikrovlnném ohřevu potravin, proto zde tento článek uvádím, jako možnost vyhodnocení experimentálních dat.

### 3.3 Vliv nehomogenních objektů

Nejprve si musíme ujasnit, co v mikrovlnné troubě ohříváme. Jedná se především o jídla, která už byla dříve uvařena, či jinak tepelně zpracována (méně často se mikrovlnná ohřev používá k přímému vaření např. příloh). Jinak na mikrovlnné pole reagují homogenní a nehomogenní potraviny.

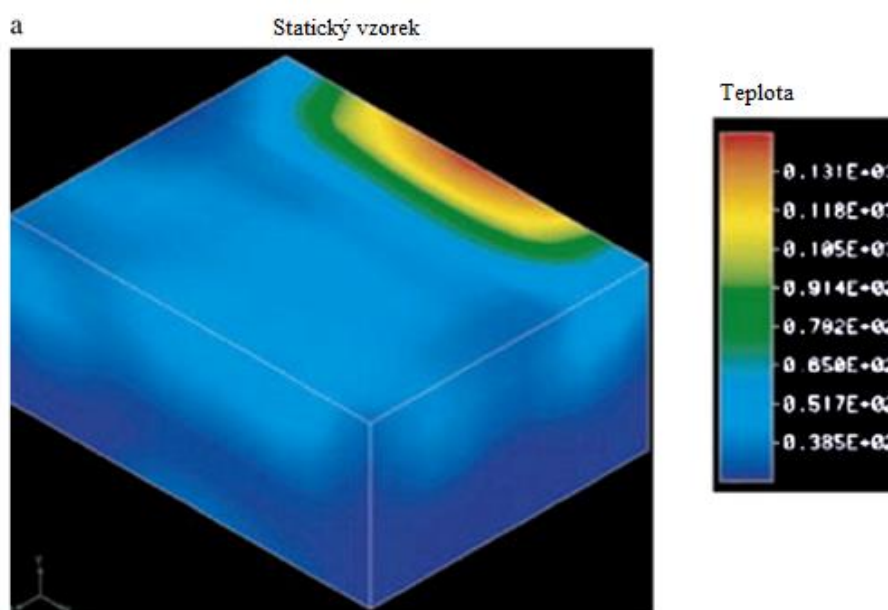
Jde o to, že homogenní jídla se ohřívají rovnoměrněji a jejich průměrná teplota roste lineárně, zatímco nehomogenní jídla se zahřívají nerovnoměrně. Lokální teplota nehomogenního jídla je závislá především na teplotě přeměny mastných kyselin a bodu varu vody [11].

V mikrovlnných troubách pro domácí použití je magnetron resp. vlnovod umístěn v boční stěně ohřívací komory. Proto je nutné jídlem (talířem) otáčet, aby se dosáhlo rovnoměrného ohřevu. V našem případě je vlnovod umístěn v horní stěně komory a bez výrazného konstrukčního zásahu není možné se vzorkem v laboratorní mikrovlnné sušárně rotovat. Tento aspekt je nutné vzít v úvahu při vyhodnocování směru přestupu tepla a rozložení teplot uvnitř vzorku.

### 3.4 Rozložení tepla

Velký problém při zahřívání jídla vzniká v nerovnoměrném zahřívání. Nejrychleji dochází k ohřevu rohů vzorku (v případě tvaru kvádra), o něco málo nižší teplota se pak nachází na hranách. Nejnižší povrchové teploty se pak nachází ve středu ploch, co nejdále od nejbližší z hran. Logická úvaha pak vede i na to, že se teplota snižuje, i když postupujeme od povrchu dovnitř, do středu vzorku.

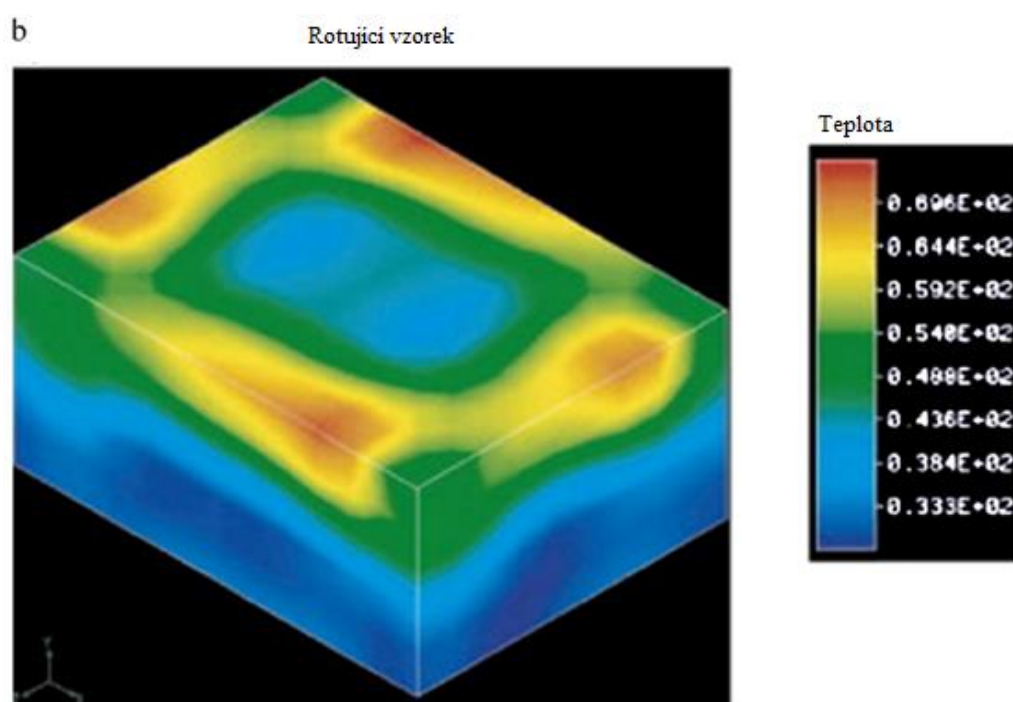
Pro dobrou představu může snadno posloužit praktický experiment. Když vyřízneme krychličku sýru eidam o délce hrany přibližně 3 cm, a dáme na 30 sekund do mikrovlnné trouby, můžeme pak krásně pozorovat rozložení tepelného ohřevu. Po dokončení časové sekvence můžeme pozorovat tečení rohů a hran kostky sýra, zatímco stěny si zachovávají svůj tvar. Pokud bychom pak rozřízli kostku sýra, zjistili bychom, že ve středu kostky nedošlo k žádné vizuální změně a že teplota uprostřed se moc neliší od pokojové teploty.



Obr. 8: Teplota ve vzorku, který se neotáčí [4]

Podstatné pro tento pokus je, že doba zahřívání je krátká a sýr má nízkou teplotu „tání“. Následkem nízké teploty tání se mikrovlny nedostanou až do středu kostky, ale zahřívají nejdříve povrch, a přestup tepla není dostatečně rychlý na to, aby se ohřál i střed kostky.

Důležité pro správné rozložení tepla, alespoň toho povrchového, je otáčení talíře, na kterém je jídlo. V případě, že se talíř neotáčí, dochází k ohřevu pouze jedné strany vzorku. Na obrázcích vidíme rozdíl teplot mezi vzorkem, který se otáčí a vzorkem, který je v konstantní poloze. Maximální dosažená teplota se nachází ve vzorku, který se neotáčí, ale příliš se neliší. Na druhou stranu celková předaná energie je mnohem větší u vzorku, který se otáčí. Tím pádem nám rotace vzorku ušetří peníze.



Obr. 9: Rovnoměrné rozložení teplot v otáčejícím se vzorku [4]

Ve všech objektech v mikrovlnném poli dochází ke zvyšování teploty z kraje objektu do středu a především v nehomogenních potravinách a jídlech dochází k tomu, že teplota na kraji a ve středu je značně rozdílná. U nehomogenních potravin navíc dochází k tomu, že nárůst teploty není lineární, aniž bychom měnili nastavení mikrovlnné trouby nebo jakkoli s objektem manipulovali. [4][5]

## 4. ZHODNOCENÍ

Tabulka 2: Srovnání nejčastěji používaných měřících technik v mikrovlnném poli.<sup>a</sup>

	Pyrometr	Optická sonda	Termočlánek
Rozmezí teplot	-40 až 2000 °C	-200 až 2000 °C	-270 až 23000 °C
Přesnost	± 2 °C	± 0,5 °C	(± 0,5 - ± 2) °C
Rychlost snímání	Velmi rychlá	Rychlá	Velmi rychlá
Cena	Vysoká	Střední až vysoká	Velmi nízká
Reakce s mikrovlnným polem	Ne	Ne <sup>b</sup>	Ano <sup>c</sup>
Výhody	- Není ovlivňován el. mag. zářením - Rychlé vyhodnocování	- Měří vnitřní teplotu - Není ovlivňován el. mag. zářením	- Velmi levný - Měří vnitřní teplotu
Nevýhody	- Závisí na měřeném povrchu - Častá recalibrace - Vhodný pouze pro měření povrchové teploty	- Sonda je citlivá na kontaminaci, degradaci a vnější deformace - Pomalá odezva	- Rušení s mikrovlnným polem - Zahřívá se v mikrovlnném poli

<sup>a</sup> Zdroj [5]

<sup>b</sup> V případě že sonda neobsahuje kovy

<sup>c</sup> V určitých případech lze značně minimalizovat povlakováním a odstíněním

Přesto, že jsem se snažil najít ekonomicky nejvhodnější způsob měření teplot v mikrovlnném poli, rozhodl jsem se termočlánek nepoužít, přestože je to nejlevnější a nejjednodušší laboratorní způsob měření teplot. Pro naše potřeby ho nelze využít. Jeho přítomnost ve vzorku výslednou teplotu ovlivňuje natolik, že bych nezískal žádná odpovídající data, se kterými by se dalo dále pracovat a i při odstínění bych musel naměřené hodnoty dokazovat jinými měřícími způsoby. Proto jsem se rozhodl termočlánek nevyužít a dále se rozhoduji mezi optickou sondou a pyrometrem. Pyrometr je pro měření v mikrovlnném poli daleko přesnější, ale jeho cena je vysoká a nastává zde problém s emisivitou, kde bychom museli provádět časté korekce. Jeho velkou výhodou je, že při měření bychom nemuseli dělat razantní zásahy do mikrovlnné sušárny. Další velkou výhodou je rychlost vyhodnocování, v čemž je daleko lepší než optická sonda. Nevýhodou však je, že neměří vnitřní teplotu vzorku, ale pouze povrchovou.



Optická sonda je drahá záležitost, kde se cena jedné sondy pohybuje v řádech několika tisíců. Navíc její velkou nevýhodou je citlivost na mechanické rázy. Její největší výhodou je přesnost měření. Navíc elektromagnetické pole, které se v mikrovlnné troubě generuje, nijak neznehodnocuje výsledky, pokud ovšem sonda, nebo její část není kovová. Problémem pro nás může být, že sonda má poněkud delší odezvu v porovnání s pyrometrem. Tento nedostatek však můžeme obejít, když budeme měřit teplotu i po skončení ohřevu a zjistíme, za jak dlouho se ustálí teplota a o kolik bude větší oproti teplotě při vypnutí (stanovíme časovou konstantu optické sondy).

# 5. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

## 5.1. Volba řešení

Při hledání konstrukčního řešení jsem musel vycházet z následujících faktů. Chci měřit uvnitř mikrovlnného pole a chci měřit vnitřní teplotu vzorku a úbytek hmotnosti. Vzhledem k prostorovému uspořádání mikrovlnné sušárny, je nutné navrhnout nosnou konstrukci vzorku a teplotní sondy, která bude spojena s váhami umístěnými mimo prostor ohřívací komory.

To, že budu měřit uvnitř mikrovlnného pole, mě omezuje jen na úzkou část materiálů, které nejsou ovlivňovány mikrovlnným zářením a odolávají teplotě minimálně 100 °C.

Jelikož chci měřit i hmotnost, a to na relativně malých vzorcích, je zapotřebí najít vhodnou laboratorní váhu s dostatečnou přesností. Vzhledem k zadání bakalářské práce, budu používat mikrovlnnou sušárnu v laboratořích fakulty, a proto jsem hledal v těchto laboratořích váhu, kterou bych mohl použít, abych nemusel pořizovat novou. Váhu s dostatečnou přesností jsem nakonec našel, ale jako nový problém se ukázala její maximální nosnost, která je 600 g. Díky tomu jsem musel volit lehký materiál a navíc bych se měl vyvarovat mohutné konstrukce. Proto jsem jako vhodný materiál zvolil plast. Konkrétní druh plastu jsem zvolil Polyamid-66 (PA-66), který je odolný, pevný a trvanlivý materiál. Vhodný pro spojovací součástky a další technické komponenty. Přijímá přibližně 2% vzdušné vlhkosti (méně než polyamid-6). Proto se po vyrobení musí nechat aklimatizovat po několik dnů. Teplota tání je 260 °C a tvarová stálost je zaručena do 100 °C.

Poté, co jsem našel vhodný materiál, zaměřil jsem se na samotnou konstrukci a na to, kde se bude nacházet váha. První varianta byla umístit váhu pod mikrovlnnou sušárnu. Výhodou této varianty byla jednoduchá konstrukce, ale velkou nevýhodou byl malý prostor pod mikrovlnnou sušárnou. Pokud bych chtěl tuto variantu použít, musel bych přestavět celou sušárnu viz obr 10.

Druhá možnost je umístit dvě váhy po stranách sušárny. Výhodou této varianty je dobrý přístup. Tato varianta však počítá s tím, že by se použily dvě váhy a byl by zde problém s vyvažováním konstrukce, která by musela být poněkud složitější.

Třetí možností je umístit váhu nahoru, nad mikrovlnnou sušárnu. To mi přijde jako nejrozumnější varianta, protože zde máme dostatek místa jak na umístění, tak na montáž. Jediným problémem zde byl magnetron, a proto jsem musel vymyslet takovou konstrukci, které by přítomnost magnetronu nevadila. (viz. Obr. 10)



Obr. 10 Mikrovlnná sušárna

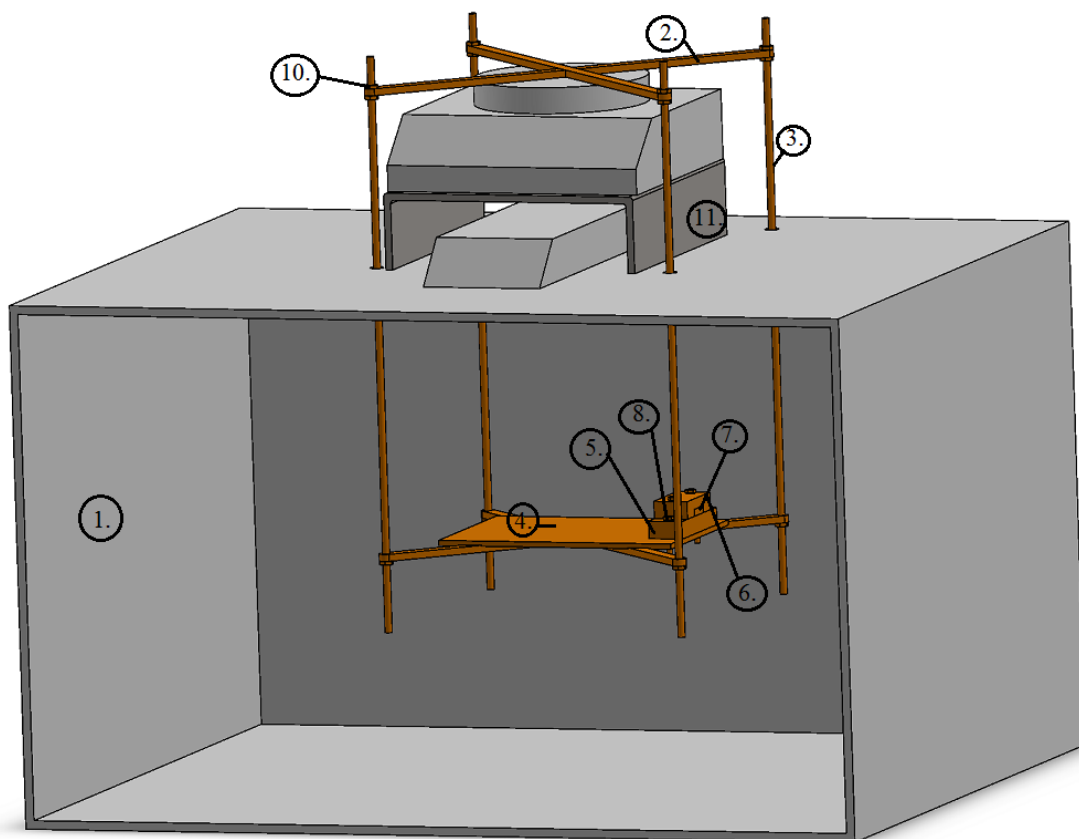
Aby byla konstrukce dostatečně stabilní, rozhodl jsem se do horní desky sušárny provrtat rovnou čtyři díry a jimi vést plastové tyčky dolů a zavěsit je na plastovém kříži, který bych usadil na váze. Stejný kříž by se pak dal použít i dole, kde by byla položena deska se vzorkem a držáčkem k uchycení sondy. Držáček je vyroben ze dvou obdélníkových profilů, přišroubovaných k nosné desce. Tyto dva profily jsou k sobě připevněny dvěma šrouby, které zajišťují svěrný spoj mezi deskami, do kterého přijde uchytit optická sonda. Aby nedošlo k rozdrčení sondy, je do horního profilu vyfrézována drážka opatřená pryžovou výstelkou, která by měla zaručit upevnění těla sondy v požadované pozici. Nosná táhla jsou vyrobena ze závitových tyčí, které umožní variabilní nastavení výšky vzorku v mikrovlnné sušárně. Spojovací kříže, zajišťující dostatečnou tuhost konstrukce jsou upevněny pomocí matic. Horní kříž je navíc zajištěn druhou maticí na každém táhle zajišťující přesnou polohu vůči závitové tyči a zároveň slouží proti povolení matic při manipulaci se stojanem. Ramena plastového kříže jsou vůči sobě vymezena a tvarově spojena drážkou, vytvořenou uprostřed délky každého z nich, která zamezuje pootočení profilů ramen vůči sobě. Úhel ramen je  $90^\circ$ . Spodní deska se vzorkem je opatřena zespoda drážkou, pro správné umístění desky na konstrukci.



Obr. 11: Schéma konstrukce

## 5.2. Postup montáže

Nejprve spojíme horní kříž, ke kterému postupně přimontujeme závitové tyče [20] pomocí matic (shora i zdola) a tím nám vznikne horní část konstrukce, kterou můžeme shora nasunout do mikrovlnné trouby. Poté připevníme držáček sondy na desku pomocí plastových šroubů a smontujeme spodní kříž, na který položíme desku s držáčkem a získáme tak spodní část konstrukce. Tu pak uchopíme do pravé ruky a do levé si připravíme čtyři matky, které jednou rukou našroubujeme na závitové tyče. Pomocí závitových tyčí můžeme regulovat výšku, ve které budeme měřit. Následně připevníme do držáčku optickou sondu. Nakonec celou sestavu nadzvedneme a umístíme pod ní váhu. Toto je doporučený postup montáže, ke kterému by měl stačit jeden člověk.



Obr. 12: Pohled na otevřenou mikrovlnnou sušárnu

Tabulka 3: Kusovník

Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
1	Mikrovltnka		1
2	Rameno kříže		4
3	Závitová tyč		4
4	Deska		1
5	Držáček spodní		1
6	Držáček horní		1
7	Guma		1
8	Šroub ISO 4014 - M3 x 20 x 12-N		4
9	Šestihranná matka ISO - 4032 - M3 - W - N		2
10	Šestihranná matka ISO - 4035 - M4 - N		12
11	Váha		1
12	Konstrukce pod váhu		1

## 6. ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout vhodnou metodu měření teplot v mikrovlnném poli pro použití ve stávající mikrovlnné sušárně umístěné v laboratořích FS ČVUT v Praze. Na základě literární rešerše a mých zkušeností s měřením teplot uvnitř mikrovlnné trouby jsem vytipoval tři nejčastěji používané teplotní sondy pro danou aplikaci.

Termočlánek je sice nejlevnější, ale pro použití v mikrovlnném poli absolutně nevhodný. Jeho vliv na měřený vzorek je značný a těžko vyhodnotitelný a i odstíněný je zatížen značnou chybou měření.

Pyrometr (nebo termokamera) je o poznání dražší a navíc měří pouze povrch vzorku. Pro naše účely i z hlediska zadání práce je také nevhodný. Navíc je zde problém se stanovením emisivity povrchu různých materiálů v našem případě především potravin.

Poslední metodou je použití optické sondy. Přes pomalou odezvu, vysokou cenu a nebezpečí rozbití nám nabízí kontaktní měření teploty přímo v mikrovlnném poli uvnitř vzorku a především s dostatečnou přesností. Není ovlivněna mikrovlnami, a proto ji volím jako nevhodnější variantu pro měření teploty v mikrovlnném poli ze všech ostatních možností, které jsem našel v dostupné literatuře (a které jsou mi známy).

Tabulka 4: Srovnání nejčastěji používaných měřících technik v mikrovlnném poli.

	Pyrometr	Optická sonda	Termočlánek
Výhody	<ul style="list-style-type: none"><li>- Není ovlivňován el. mag. zářením</li><li>- Rychlé vyhodnocování</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Měří vnitřní teplotu</li><li>- Není ovlivňován el. mag. zářením</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Velmi levný</li><li>- Měří vnitřní teplotu</li></ul>
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"><li>- Závisí na měřeném povrchu</li><li>- Častá recalibrace</li><li>- Vhodný pouze pro měření povrchové teploty</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Sonda je citlivá na kontaminaci a degradaci a vnější deformace</li><li>- Pomalá odezva</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rušení s mikrovlnným polem</li><li>- Zahřívá se v mikrovlnném poli</li></ul>

Pro současné měření teploty a úbytku hmotnosti vzorku v mikrovlnné sušárně jsem navrhl konstrukci, jejíž části jsou vyrobeny z plastu, který odolává teplotě do 100 °C a tím má nižší hmotnost. Celá konstrukce tak nepřesáhla hmotnost 500 g. Konstrukce je volena s ohledem na jednoduchou manipulaci, přístupu ke vzorku i teplotní sondě a snadnému uchycení na laboratorních vahách.



## 7. SEZNAMY

### 7.1 Seznam obrázků

- Obr. 1: Magnetron používaný v mikrovlnných troubách  
Obr. 2: Řez magnetronem  
Obr. 3: Vznik teploty třením molekul  
Obr. 4: Průřez Fabry-Pérotovým senzorem  
Obr. 5: Blokové schéma pyrometru a termokamery  
Obr. 6: Schéma optické sondy  
Obr. 7: Měření teploty pomocí pyrometru s a bez termočlátku  
Obr. 8: Teplota ve vzorku, který se neotáčí  
Obr. 9: Rovnoměrné rozložení teplot v otáčejícím se vzorku  
Obr. 10 Mikrovlnná sušárna  
Obr. 11: Schéma konstrukce  
Obr. 12: Pohled na otevřenou mikrovlnnou sušárnu

### 7.2 Seznam tabulek

- Tabulka 1: Penetrační hloubka potravin  
Tabulka 2: Srovnání nejčastěji používaných měřících technik v mikrovlnném poli.  
Tabulka 3: Kusovník  
Tabulka 4: Srovnání nejčastěji používaných měřících technik v mikrovlnném poli

### 7.3 Seznam značení

Q	[W.m <sup>-3</sup> ]	Generovaný výkon v objemu vzorku
f	[Hz]	Frekvence elektromagnetických vln
E	[V.m <sup>-1</sup> ]	Amplituda intenzity elektrického pole
R	[s]	Rychlost ohřevu
P	[W]	Výkon
T	[°C]	Teplota
t	[s]	Čas
c <sub>p</sub>	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita
x	[m]	Vzdálenost od povrchu

$\varepsilon''$	[-]	Permittivita
$\varepsilon_0$	[F.m <sup>-1</sup> ]	Permittivita vakua
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota

## 8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] A. Birnboim, Y. Carmel (1999): Simulation of Microwave Sintering of Ceramic Bodies with Complex Geometry. *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 82 (11), pp. 3024-3030.
- [2] M. McSherry, E. Lewis, C. Fitzpatrick (2005): Development of temperature sensitive glassware for monitoring temperatures in harsh industrial environments. *Department of Electronics and Computer Engineering*, Vol. 123-124, pp. 408-417.
- [3] B. Schmauß, M. Mirz, J. Ernst (1995): A fiber-optic sensor for microwave field measurements. *American Institute of Physics*, Vol. 66, pp. 4031-4033.
- [4] S. He, M. M. Mench, S. Tadigadapa (2005): Thin film temperature sensor for real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell. *Elsevier*, pp. 170-177.
- [5] T. Durka, G. D. Stefanidis, T. Gerven and A. Stankiewicz (2010): On the accuracy and reproducibility of fiber optic (FO) and infrared (IR) temperature measurements of solid materials in microwave applications. *Meas Science Technology*, pp. 1-7.
- [6] A. Akbarnezhad, K. S. C. Kuang and K. C. G. Ong (2011): Temperature sensing in microwave heating of concrete. *Magazine of Concrete Research: ResearchGate*, Vol. (63), pp. 275-285.
- [7] W. E. Olmstead, M. E. Brodwin (1996): A model for thermocouple sensitivity during microwave heating. *Elsevier Science Ltd.*, Vol. 40, pp. 1559-1565.
- [8] E. Pert, Y. Carmel, A. Birnboim, T. Olorunyolemi, D. Gershon, J. Calame, Isabel K. Lloyd, and O. C. Wilson Jr. (2001): Temperature Measurements during Microwave Processing: The Significance of Thermocouple Effects. *Journal of the American Ceramic Society-Pert et al.*, Vol. 84, pp. 1981-1986.
- [9] C. E. Davis, A. J. Dickherber, W. D. Hun and G. S. May (2008): In Situ Acoustic Temperature Measurement During Variable-Frequency Microwave Curing.: *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, Vol. 31, pp. 273-284.
- [10] BUREŠ. Seebeckův jev [online]. 2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>

- [11] F. R. Van de Voort, M. Laureano, J. P. Smith, *A practical Thermocouple for Temperature Measurement in Microwave Ovens*, : Department of Food Science and Agricultural Chemistry, 1987. ISSN 279-284
- [12] Pavel Landa. Neviditelný pes. <http://neviditelnypes.lidovky.cz/>. [online]. 2.6.2016 [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: [http://neviditelnypes.lidovky.cz/historie-nas-podil-na-radaru-dlv-p\\_veda.aspx?c=A070729\\_105316\\_p\\_veda\\_wag](http://neviditelnypes.lidovky.cz/historie-nas-podil-na-radaru-dlv-p_veda.aspx?c=A070729_105316_p_veda_wag)
- [13] The Magnetron [online]. 2015 [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/magnetron.html>
- [14] Petr Veselý. Novinky. Novinky.cz: Zdraví. [online]. 11.6.2009 [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/zena/zdravi/170993-o-vareni-v-mikrovlnne-troubekoluje-mnoho-nesmyslnych-mytu.html>
- [15] Thermometer. Medical discoveries. [online]. 2016 [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://www.discoveriesinmedicine.com/Ra-Thy/Thermometer.html>
- [16] Blue Road Research, Overview of Fiber Optic Sensors, [online]. 3.6.2016 [cit. 2016-06-03]. Dostupné z: [www.blueroadresearch.com](http://www.blueroadresearch.com).
- [17] Technored. : *terie3*. [online]. 3.6.2016 [cit. 2016-06-03]. Dostupné z: <http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie3.htm>
- [18] Collective of authors, IMPAC Infrared GmbH. *Pyrometer-Handbook*. : IMPAC Infrared GmbH, 2004.
- [19] S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, Tanmay Basak, *Microwave food processing, Food Research International*, 2013. ISSN 243-261
- [20] Plastové součástky. : *Informace o materiálech*. [online]. 3.6.2016 [cit. 2016-06-03]. Dostupné z: [http://www.plastovesoucastky.cz/datadocs/materialy\\_CZ.pdf](http://www.plastovesoucastky.cz/datadocs/materialy_CZ.pdf)
- [21] Jiří Šesták, Rudolf Žitný. *Tepelné pochody*. v Praze: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01630-7.
- [22] Ayappa, K. G., et al: *Microwave heating: An evaluation of power formulation*. Chemical Engineering Science, 46, 1991, č. 4, s 1005-1016