

# **Studie rozložení teplotních polí v dielektricky ohřívaných kaučucích**

Bc. Jan Kartousek

---

Diplomová práce  
2008

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2007/2008

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KARTOUSEK**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Studie rozložení teplotních polí v dielektricky ohřívaných kaučucích**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Stanovte plán experimentu a experimentální zařízení**
- 3. Provedte experimentální práce s DE ohřevem vybraných kaučuků**
- 4. Závěr — vyhodnoťte a navrhnete technologické podmínky a ekonomické přínosy ohřevu kaučuku**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**1.DVOŘÁK, Zdeněk, SVOBODA, Ivan. Vývoj spotřeby energií na přípravě gumárenských směsí : Nové směry v gumárenství. Sborník přednášek. Zlín : Univerzita Tomáše Bati , 2003. s. 37. ISBN 80-7318-149-5.**

**2.Elektromagnetické pole [online]. [1999] [cit. 2005-05-06]. Dostupný z WWW:**

**3.Spectrum of electromagnetic waves [online]. [2000] [cit. 2005-05-01].**

**4.ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev. Elektro. 2003, č. 3, s. 57**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2008**

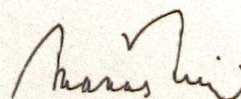
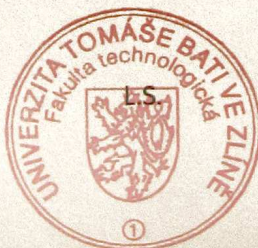
Termín odevzdání diplomové práce:

**23. května 2008**

Ve Zlíně dne 29. ledna 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá studiem rozložení teplotních polí uvnitř dielektricky ohřívacích kaučuků. V první části bylo zkoumáno rozložení polí při konvenčním ohřevu v horkovzdušné troubě. Následně bylo obdobné měření uskutečněno v mikrovlnné komoře a výsledky byly porovnány. Při dielektrickém ohřevu byly zjištěny některé anomálie.

Klíčová slova: dielektrický ohřev, mikrovlny, kaučuk, teplotní pole

## **ABSTRACT**

This thesis deals with study of distribution of fields of temperatures inside dielectric warming rubbers. In first part there has been studied distribution of fields of temperature during conventional warming inside hot-air equipment. Sequentially was accordingly made measuring in microwave oven. Results were compared. There were detected some abnormalities during microwave warming.

Keywords: dielectric warming, microwave, rubber, field of temperature

Děkuji vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc., za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování diplomové práce. Mé poděkování patří též studentovi Martinu Krumalovi za to, že mi pomáhal s měřeními v první části praktické části.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně 12. 5. 2008

.....

Bc. Jan Kartousek

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 DOSAVADNÍ POZNATKY V OBLASTI MW OHŘEVU KAUKČUKŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>2 TEORIE SDÍLENÍ TEPLA</b> .....	<b>13</b>
2.1 VEDENÍ TEPLA .....	14
2.2 PROUDĚNÍ TEPLA.....	15
2.3 SÁLÁNÍ TEPLA .....	16
<b>3 DIELEKTRICKÉ TEPLLO</b> .....	<b>17</b>
3.1 DIELEKTRIKUM .....	17
3.2 KRUHOVÝ KONDENZÁTOR.....	18
3.3 NEKRUHOVÝ KONDENZÁTOR.....	20
3.4 CHARAKTERISTIKY DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU .....	20
3.4.1 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci .....	20
3.4.2 Ekonomické přínosy.....	21
3.5 POUŽÍVANÉ FREKVENCE.....	22
<b>4 POUŽITÍ DIELEKTRICKÝCH OHŘEVŮ</b> .....	<b>23</b>
4.1 SUŠENÍ .....	23
<b>5 KONSTRUKCE DIELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>25</b>
5.1 KOMBINACE MIKROVLNNÉHO A KONVENČNÍHO OHŘEVU .....	25
5.2 SPOLEHLIVOST .....	25
5.3 INSTALACE .....	26
5.4 KONTINUÁLNÍ LINKY.....	26
<b>6 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....	<b>28</b>
6.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY .....	29
6.1.1 Hustota elektrického náboje.....	29
6.1.2 Intenzita elektrického a magnetického pole .....	30
6.1.3 První Maxwellova rovnice .....	31
6.1.4 Druhá Maxwellova rovnice.....	32
6.1.5 Třetí Maxwellova rovnice .....	33
6.1.6 Čtvrtá Maxwellova rovnice.....	33
6.2 VZNIK ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN .....	34
6.3 ODRAZ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN OD VODIVÉ DESKY.....	35
<b>7 MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>36</b>
7.1 KAPALINOVÝ TEPLOMĚR .....	36
7.2 BIMETALOVÝ TEPLOMĚR .....	36
7.3 TERMOELEKTRICKÝ TEPLOMĚR .....	37
7.4 ODPOROVÝ TEPLOMĚR .....	37
7.5 BEZDOTYKOVÝ INFRAČERVENÝ TEPLOMĚR.....	38
<b>8 MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY</b> .....	<b>39</b>

8.1	PERMITIVITA .....	39
8.2	RELATIVNÍ PERMITIVITA .....	40
<b>9</b>	<b>SHRNUTÍ STUDIJNÍ ČÁSTI.....</b>	<b>41</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>10</b>	<b>KONVENČNÍ PŘEDEHŘEV KAUČUKU .....</b>	<b>44</b>
10.1	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ .....	44
10.2	POSTUP MĚŘENÍ.....	45
<b>11</b>	<b>DIELEKTRICKÝ PŘEDEHŘEV .....</b>	<b>48</b>
11.1	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	48
11.2	KONTROLNÍ MĚŘENÍ.....	48
11.2.1	Ověření výpočtem .....	49
11.3	OHŘEV KAUČUKŮ O NORMÁLNÍ TEPLOTĚ .....	50
11.3.1	Souhrnné výsledky - teplota.....	52
11.3.2	Souhrnné výsledky - směrodatná odchylka.....	53
11.3.3	Souhrnné výsledky - graf .....	53
11.4	OHŘEV ZMRAZENÝCH VZORKŮ.....	53
11.4.1	První série.....	54
11.4.2	Druhá série .....	54
11.4.3	Třetí série .....	56
<b>12</b>	<b>MĚŘENÍ TEPELNÉ KAPACITY.....</b>	<b>58</b>
12.1	KALORIMETRICKÁ ROVNICE A POUŽITÉ VYBAVENÍ.....	58
12.2	PRŮBĚH MĚŘENÍ .....	58
<b>13</b>	<b>MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY .....</b>	<b>61</b>
13.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	61
13.2	PRŮBĚH MĚŘENÍ .....	61
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>72</b>



## ÚVOD

Konkurenční prostředí evropského a světového trhu vyvíjí velký tlak na zvyšování kvality a snižování cen výrobků v gumárenském průmyslu. Úkolem technologů je znovu pohlížet na již zvládnuté a zavedené výrobní procesy a optimalizovat je právě s ohledem na snižování výrobních nákladů. Toho lze v zásadě dosáhnout dvěma způsoby, či lépe jejich kombinací. První způsob je zvyšování automatizace výroby a tím i eliminace chyb způsobených selháním lidského faktoru, druhý způsob je optimalizace samotného výrobního procesu za účelem snížení jeho energetické náročnosti.

Velká část energie je v gumárenské výrobě upotřebena na předehřev kaučukových směsí. V současné době se tak děje konvenčním horkovzdušným ohřevem materiálu uloženého do vyhrazených skladů. Ohřev v nich trvá až 3 dny a o tuto dobu se prodlužuje výrobní cyklus.

Avšak i v tomto odvětví lze aplikovat moderní mikrovlnný ohřev. Jeho hlavní výhodou je několikanásobně rychlejší ohřev materiálu při nižších energetických nárocích. Mikrovlnná zařízení jsou též prostorově nenáročná, nevyžadují oddělené prostory a jejich provoz je bezpečný.

Tato práce navazuje na několik dalších bakalářských a diplomových prací a hodnotí kvalitu dielektrického ohřevu po stránce rozložení teplotních polí. Tomuto tématu je třeba věnovat zvýšenou pozornost, neboť mechanismus mikrovlnného ohřevu je zcela odlišný od konvenčního horkovzdušného ohřevu. Je tedy třeba zkoumat vliv jednotlivých materiálových konstant na rychlost ohřevu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 DOSAVADNÍ POZNATKY V OBLASTI MW OHŘEVU KAUČUKŮ

V roce 2007 byla studentem UTB Zdeňkem Kejnarem napsána a obhájena Bakalářská práce na téma Ohřev kaučuků mikrovlnnou (MW) technologií [8]. Jejím účelem bylo vyšetřit výkonnost a efektivnost dielektrického ohřevu kaučuků oproti konvenčním ohřevům a ekonomické výhody MW ohřevu.

Na základě provedených experimentů byla řešena otázka rychlosti a ekonomické výhodnosti DE ohřevu mikrovlnnou technologií oproti konvenčním způsobům ohřevu. Dále bylo provedeno měření teplotní a tepelné vodivosti.

[8]

Měření a následným zpracováním hodnot bylo potvrzeno, že DE ohřev MW technologií je několikanásobně rychlejší a tím i energeticky méně náročný nežli konvenční způsoby ohřevu. Ohřev sáláním a konvenční ohřev dosáhly požadované teploty, ovšem za několikanásobně delší čas. Delší ohřev znamená také vyšší energetickou spotřebu. Ekonomickým zhodnocením investice do pořízení MW zařízení, bylo zjištěno, že návratnost ve srovnání s investicí do pořízení zařízení, využívajícího ohřev prouděním je téměř stejná a podle efektivnosti také. Výpočty se vztahují pouze na pořízení uvedených zařízení. Nejsou zde obsaženy další důležité náklady (např. provozní), se kterými je z důvodu efektivnosti MW technologie nutné počítat.

[8]

V roce 2006 byla studentem UTB Bc. Michalem Biolkem napsána a obhájena Diplomová práce na téma Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky.

Cílem experimentu bylo navrhnout a zkonstruovat modelové MW zařízení s propojením dvou zdrojů (magnetronů) do jedné MW komory. Na základě literární studie bylo cílem vyhodnotit na tomto zařízení chování elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné komory a posoudit vliv přídavného zdroje (magnetronu). Součástí experimentu bylo dále posoudit kvalitu a homogenitu elektromagnetického pole vlivem změny tvaru mikrovlnné komory (dle možností).

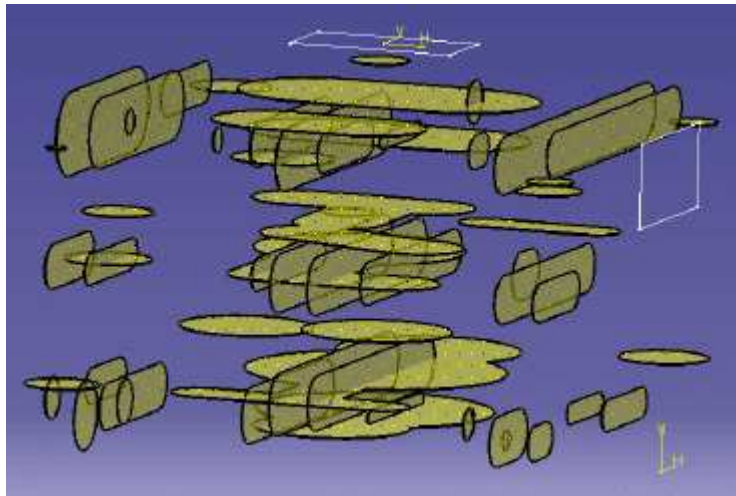
[9]

I když štítkové hodnoty výkonu jsou u obou zdrojů stejné (900W), výkony se značně liší. U konvenčního zdroje č.1 je průměrná hodnota výkonu 570,8 W a u přidaného zdroje č.2 vyrobeného firmou ROMILL je průměrná hodnota výkonu 891,5 W. Zdroj č.1 prokazuje

značně nižší účinnost než zdroj č.2. Při zatěžování oběma zdroji najednou hraje dominantní roli právě zdroj č.2, protože hodnoty se mezi zatěžování oběma zdroji a zdrojem č.2 příliš neliší.

[9]

Rozložení MW pole uvnitř komory bylo vyšetřováno pomocí faxového papíru vkládaného mezi polystyrenové desky tak, aby byl zaplněn celý objem komory. Horní vstup se ukázal jako přijatelnější pro celkovou homogenitu v celé MW komoře. Při změně tvaru MW komory nedocházelo k výrazným změnám v homogenitě elektromagnetického pole. Kruhová komora neprokázala ani pozitivní ani negativní vliv. Největší a nejpozitivnější vliv na homogenitu elektromagnetického pole prokázal rotační pohyb materiálu. Při podrobném zkoumání rozložení elektromagnetického pole v MW komoře se ukázalo, že zvýšené intenzity se vyskytují převážně u kovových stěn (tj. na zadních a bočních stěnách), avšak nikoliv v přední části u dveřního skla s kovovou mřížkou. Toto sklo zřejmě absorbuje určité množství elektromagnetického vlnění (elektromagnetických vln).



Obr.:1. Rozložení MW pole uvnitř komory při použití obou zdrojů

## 2 TEORIE SDÍLENÍ TEPLA

Sdílení tepla je základem celé řady průmyslových procesů, například sušení, vlhčení, ohřevu, chlazení, krystalizace, apod. Na základě poznatků z oboru sdílení tepla se konstruují chladicí a topné systémy, sušičky, klimatizační systémy, tepelné izolace, apod.

Základním předpokladem pro vedení tepla je rozdíl teplot dvou bodů látky, kterému říkáme teplotní gradient. Ten je definován jako podíl rozdílu teplot a vzdálenosti dvou rovnoběžně uložených desek.

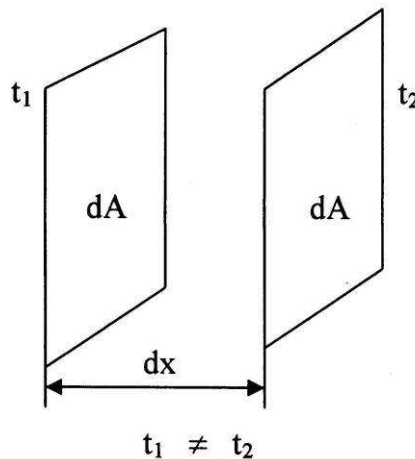
$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) = \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

kde:

$\Delta t$  - rozdíl teplot desek [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta x$  - rozdíl vzdálenosti desek [m]

$dx$  - vzdálenost desek [m]



Obr.:2. Schéma teplotního gradientu

Teplo se prostředím šíří třemi základními způsoby:

- vedením - při vedení (neboli kondukcii) se tepelná energie postupně šíří v nepohyblivé hmotě.
- prouděním - při proudění (neboli konvekci) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.
- tepelným zářením - při tepelném záření (neboli sálání či radiaci) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

## 2.1 Vedení tepla

V pevných látkách se teplo sdílí mezi částicemi tělesa. Je-li přitom zachována tepelná rovnováha, charakterizována teplotou, nazývá se tento druh sdílení tepla vedením. Množství tepla procházející pevnou látkou je přímo úměrné teplotnímu rozdílu ve směru toku energie, dále je přímo úměrné ploše kolmé na směr toku a nepřímo úměrné vzdálenosti teplotních rovin. Tuto závislost poprvé formuloval Fourier.

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

kde:

$q$  - velikost tepelného toku [ $\text{Js}^{-1}$ ]

$\lambda$  - součinitel tepelné vodivosti [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$\nabla t$  - gradient teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Koeficient tepelné vodivosti  $\lambda$  vyjadřuje množství tepla, které proteče jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém gradientu teploty. Koeficient tepelné vodivosti tedy popisuje změnu teploty v prostoru a předpokládá konstantní průběh v čase, což odpovídá stacionárním podmínkám děje.

Teplotní gradient je vektor, jehož směr je opačný než směr tepelného toku  $Q$ , což je respektováno záporným znaménkem na pravé straně vztahu. Součinitel tepelné vodivosti je jednou z termofyzikálních vlastností materiálu a její hodnota je pro různé materiály uváděna v technických a fyzikálních tabulkách.

Při vedení tepla část své pohybové energie předávají pomocí nárazů sousední částice těles. Vedení tepla je nejčastější způsob šíření tepla v pevných tělesech, podle rychlosti vedení tepla se pevné látky dělí na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Porovnat látky podle jejich tepelné vodivosti umožňuje veličina součinitel tepelné vodivosti.

Ze všech látek mají nejlepší tepelnou vodivost kovy. Přitom kov, který je lepším elektrickým vodičem, je také lepším vodičem tepla. Je to způsobeno tím, že tepelná i elektrická vodivost kovů je zprostředkována volnými elektrony. Dobré tepelné vodivosti kovů se využívá v technice, kovové jsou radiátory, stěny parního kotle, chladící tělesa apod.

Vztah pro intenzitu tepelného toku stěnou:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

$t_1, t_2$  - teplota na povrchu stěny [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\delta_1, \delta_2$  - tloušťka stěn [m]

$\lambda_1, \lambda_2$  - tepelná vodivost [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

A - plocha [ $\text{m}^2$ ]

Q - tepelný tok [W]

## 2.2 Proudění tepla

Proudění tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v kapalinách a plynech, při kterém se přemísťují přímo částice s větší energií. Ve srovnání s vedením tepla může být proudění tepla rychlejší. Proudění popisuje Fourierův zákon ochlazování.

$$\bar{q} = \alpha(t_s - t_l)A \quad (4)$$

kde:

q - měrný tepelný tok [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\alpha$  - koeficient přestupu tepla [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$t_s$  - teplota pevné stěny [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_l$  - teplota tekutiny [ $^{\circ}\text{C}$ ]

A - plocha teplosměnné plochy [ $\text{m}^2$ ]

Samovolné tepelné proudění stoupá vzhůru, protože teplejší části kapalin a plynů mají menší hustotu. Takto proudí například vzduch ve vytápěné místnosti a na tomto principu funguje tzv. komínový efekt. Při nuceném proudění je pohyb látky zajištěn dodáním mechanické energie například čerpadlem, nebo ventilátorem.

Předávání tepla mezi pevnou látkou a kapalinou je přestup tepla. Základem tohoto děje jsou procesy odehrávající se v blízkosti povrchu tělesa, kde se předpokládá existence nehybné vrstvy tekutiny, v níž se teplo předává pouze vedením. Dále od povrchu je laminárně proudící vrstva tekutiny. Vztah pro výpočet tepelných ztrát přirozenou konvekcí:

$$\dot{Q} = A_1 \alpha_1 (t_w - t_v) \quad [\text{W}] \quad (5)$$

kde:

Q - tepelný tok [W]

A - plocha [ $\text{m}^2$ ]

$\alpha$  - koeficient přestupu tepla [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$t_w$  - teplota na povrchu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_v$  - teplota vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 2.3 Sálání tepla

Při tomto způsobu přenosu tepelné energie jsou nositeli tepelné energie elementární částice hmoty (fotony), šířící se rychlostí světla v plynném prostředí nebo vakuu. Ty vznikají přeměnou tepelné energie. Jedná se o infračervené záření s vlnovou délkou 800-4000 nm. K sálání dochází i ve vakuu. Platí zde veškeré zákony pro elektromagnetické záření, tedy dochází k odrazu a pohlcování na fázovém rozhraní.

Pro řešení mezních situací je zaveden pojem absolutně černého tělesa, u něž platí, že veškerá přijatá energie je jím pohlcena a pojem absolutně bílého tělesa, u něž platí, že veškerá přijatá energie je jím odražena. Platí zde Stefanův-Boltzmannův zákon. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa.

$$I = \sigma T^4 \quad (6)$$

kde:

I - celková intenzita záření [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ]

T - termodynamická teplota [K]



### 3 DIELEKTRICKÉ TEPLŮ

#### 3.1 Dielektrikum

Dielektrikum je izolační látka, která má schopnost být polarizována. Všechny izolanty dielektrikem nejsou. Je-li dielektrikum vloženo do elektrického pole, působí toto na elektrické náboje v atomech, z nichž je složeno a způsobí změnu rozložení elektrických nábojů v něm. To pak zpětně působí na elektrické pole. Je-li dielektrikum vloženo mezi elektrody kondenzátoru, dojde ke zvýšení jeho kapacity úměrně velikosti relativní permitivity, která je vždy větší, než jedna. Průrazné napětí dielektrik je totiž větší, než u vzduchu.

$$C = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (7)$$

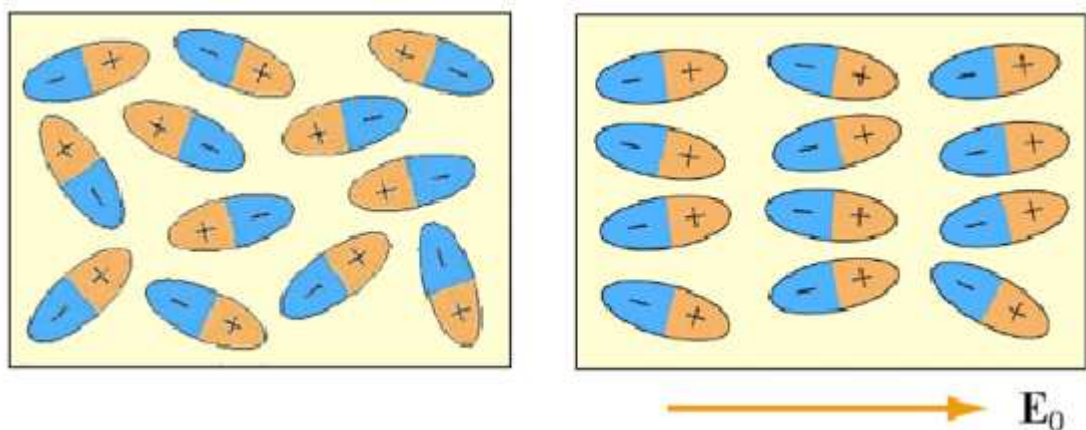
kde:

$C_0$  - kapacita kondenzátoru bez dielektrika [ $\mu\text{F}$ ]

$C$  - kapacita kondenzátoru s vloženým dielektrikem [ $\mu\text{F}$ ]

$\epsilon_r$  - relativní permitivita []

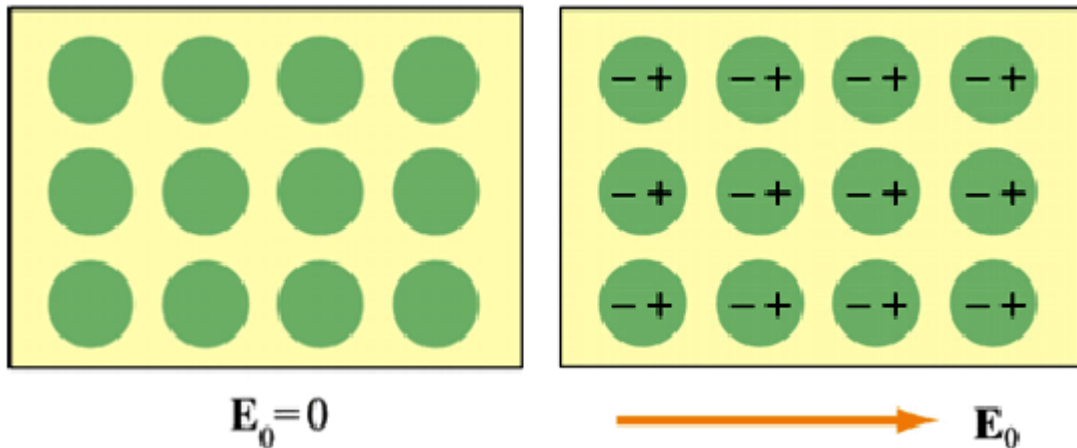
Existují dva druhy dielektrik. Pokud v něm existují trvalé nenulové dipólové momenty, nazýváme jej *polární dielektrikum*. Zpravidla je tvořeno kladnými a zápornými ionty. Pokud na takové dielektrikum nepůsobí žádné elektrické pole, jsou dipóly uspořádány náhodně. V elektrickém poli se pak natočí podle směru jeho intenzity a generují tak elektrické pole s opačným směrem a menší intenzitou. Dielektrikum je tak iontově polarizováno. Typickým představitelem polárního dielektrika je voda.



Obr.:3. Polární dielektrikum bez a s působením elektrického pole

*Nepolární dielektrikum* žádné trvalé dipólové momenty nemá, neboť uspořádání atomů je takové, že se v nich překrývají těžiště kladných a záporných nábojů. Elektrické dipólové

momenty ale mohou být indukovány v elektrickém poli. Kladné a záporné elektrické náboje se vůči sobě posunou o malou vzdálenost a dielektrikum je tak atomově či elektronově polarizováno. Vzniklé dipólové momenty jsou však o několik řádů menší než u polárních dielektrik.



Obr.:4. Nepochární dielektrikum bez a s působením elektrického pole

### 3.2 Kruhový kondenzátor

Na obrázku je vyznačen kondenzátor s kruhovými deskami o poloměru  $r_1$  a konstantní vzdáleností  $d$  mezi nimi. Střídavý proud vysokého kmitočtu přivádíme do středu obou desek. Elektrody uvažujeme relativně velké k vzájemné vzdálenosti, takže můžeme zanedbat deformace elektrického pole na krajích elektrod. Mezi elektrodami je tak uvažováno homogenní elektrické pole a celkový indukční tok  $\psi=Q=D \cdot S$ , kde  $D$  je hustota elektrického toku, tj. elektrická indukce. Velikost  $D$  ve vakuu je rovna  $D = \epsilon_0 \cdot E_1$  kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua. Tedy  $Q=D \cdot S= \epsilon_0 \cdot E \cdot S$ . Pokud vztah vynásobíme vzdáleností  $d$  mezi deskami, získáme  $Q_d= \epsilon_0 \cdot S \cdot E \cdot d = \epsilon_0 \cdot S \cdot U$ , kde  $U$  je napětí mezi elektrodami. Kapacita vakuového (tj. přibližně i vzduchového) kondenzátoru je podle vztahu  $C=Q/U$  rovna:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (8)$$

kde:

$C$  - kapacita kondenzátoru [F]

$\epsilon_0$  - permitivita vakua [ $\text{Fm}^{-1}$ ]

$\epsilon_r$  - relativní permitivita [-]

$A$  - plocha elektrody [ $\text{cm}^2$ ]

$d$  - vzdálenost elektrod [cm]

Jakmile vložíme mezi elektrody libovolnou izolační látku a k elektrodám přivedené elektrické napětí, ocitne se tato látka v elektrickém poli. To způsobí polarizaci molekul a atomů - vznik dipólů. To znamená, že kladné částice se natočí k zápornému pólu a naopak. V látce může nastat současně i více druhů polarizace současně, např. dipólová, iontová, elektronová, strukturovaná a spontánní. Všechny kladné a záporné náboje se uvnitř dielektrika vyruší. Pokud k elektrodám přivedeme střídavé napětí s harmonickým průběhem a budeme zvyšovat frekvenci  $f$ , dipóly se budou otáčet téměř o  $180^\circ$  se stejnou frekvencí, jakou má elektrické pole. Uvnitř látky vzniknou mechanické vibrace. Ty jsou mírněny mezimolekulárními silami a třením, což má za následek energetické ztráty a tedy vznik tepla. Při dalším zvyšování  $f$  již dipóly nestačí oscilovat s polem a začnou se zpožďovat. Tím začne klesat relativní permitivita  $\epsilon_r$ .

Obvykle požadujeme, aby bylo prohřátí dielektrika v celém objemu rovnoměrné. Lze toho dosáhnout tehdy, je-li použitá vlnová délka výrazně delší, než poloměr  $r_1$ . Množství tepla vyvinutého v materiálu je v případě, že celý prostor mezi elektrodami je vyplněn materiálem dán výrazem:

$$P = 5,55 \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \frac{S}{d} \cdot U_f^2 \cdot 10^{-13} \left[ W; Hz; cm^2 \cdot cm^{-1} \right] \quad (9)$$

kde:

$f$  - použitý kmitočet [Hz]

$\epsilon_r$  - relativní permitivita [-]

$\operatorname{tg} \delta$  - tg ztrátového úhlu [-]

$S = \pi \cdot r^2 / cm^2$  - plocha elektrody

$d$  - vzdálenost elektrod [cm]

$U_f$  - přiváděné napětí (efektivní hodnota) [V]

Hodnoty  $S$  a  $d$  udávají velikost prostoru obsazeného materiálem. Součin  $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta$  se nazývá ztrátový činitel materiálu. Přiváděné napětí  $U_f$  může být pouze tak vysoké, aby nedošlo k přeskoku jiskry mezi elektrodami. Bývá 10 až 15 kV. Použitý kmitočet má přímý vliv na množství vyvinutého tepla.

Relativní permitivita  $\epsilon_r$  má pro prakticky používané materiály (kůže, dřevo, papír, pryskyřice, PVC) hodnoty v rozsahu 2 až 5. Tg ztrátového úhlu je přibližně 0,01 až 0,09. Při výpočtech se kondenzátor s dielektrickými ztrátami nahrazuje kondenzátorem bezztrátovým, ke kterému je paralelně připojen odpor  $R_z$ . Ztráty v tomto odporu jsou právě tak veliké, jako skutečné ztráty v kondenzátoru s dielektrickými ztrátami.

Dielektrický ohřev je v mnoha ohledech podobný indukčnímu ohřevu. Pracovním nástrojem u indukčního ohřevu je cívka, ohřívají se elektricky dobře vodivé materiály a při ohřevu se uplatňuje především magnetická složka elektromagnetického vlnění. Při dielektrickém ohřevu se naproti tomu uplatňuje především elektrická složka, pracovním nástrojem je kondenzátor a ohřívají se elektrické izolanty. Teoretické základy obou metod ohřevu využívají společné poznatky z elektrodynamiky a vyplývající z Maxwellových rovnic.

Předností obou způsobu ohřevu je fakt, že teplo vzniká přímo v ohřívaném materiálu. Ten je tak nejteplejší částí celého zařízení a ostatní části mohou být zcela studené.

### 3.3 Nekruhový kondenzátor

Podle vztahu (9) se v praxi počítají i jiné než válcové kondenzátory, avšak pouze za podmínky, že nejvzdálenější místo elektrody od napájecího bodu je max do 5% délky vlny. Pro frekvenci 27,12 MHz je tato vzdálenost cca 27 cm. Při větší frekvenci (ten bývá přidělen s ohledem na rušení telekomunikačních zařízení) se tedy maximální vzdálenost zmenšuje a hrozí nebezpečí nerovnoměrného ohřevu. Tomu se lze vyvarovat dvěma způsoby. Můžeme nechat ohříváný materiál pohybovat uvnitř elektrického pole tak, aby postupně každá jeho část prošla všemi hodnotami pole (kuchyňská mikrovlnná trouba s rotujícím talířem). Jiným způsobem je rozdělení elektrod a napájení na více částí.

### 3.4 Charakteristiky dielektrického ohřevu

Pokud se vsázka skládá z více materiálů, při dielektrickém ohřevu se ohřívá pouze ta, jež absorbuje elektromagnetické vlnění (v případě potravin se ohřívá nejdříve voda). Ostatní složky se pak od ní ohřívají pouze vedením. Tímto způsobem lze ohřívát elektricky zcela nevodivé látky. Díky použitému principu lze dosáhnout vyšší teploty v jádru materiálu, než na povrchu. Materiál se ohřívá v celém objemu a dosahuje se značné rovnoměrnosti ohřevu s možností snadné a přesné regulace teploty a zabránění lokálnímu přehřátí. Výrobky není třeba vyndávat z obalů, neboť elektrické pole jimi pronikne bez obtíží.

#### 3.4.1 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Moderní zařízení pro dielektrický ohřev nezhoršují pracovní podmínky na pracovišti, nejsou zdrojem hluku, zápachu, vibrací, prachu ani odpadního tepla. Elektromagnetické záření vycházející ze zařízení jsou několikanásobně pod úrovní hygienických norem a jsou srovnatelné se zářením mobilního telefonu. Dielektrický ohřev je bezpečný, neboť při něm

nedochází k žádnému druhu spalování. Žádná část zařízení není horká a nelze se tedy popálit.

### 3.4.2 Ekonomické přínosy

Zařízení pro dielektrický ohřev bývají o něco vyšší, než v případě konvenčních zařízení, ale tato nevýhoda je více než vyvážena klady této technologie:

- snadná a rychlá instalace - odpadají stavební úpravy, snadnější připojení médií, snadná rekonstrukce starých provozů na DE technologii
- nižší prostorové nároky - DE zařízení jsou kompaktní a šetří podlahovou plochu a tím finance nutné k výstavbě výrobních prostor. Další úspory prostor plynou z faktu, že není třeba instalovat další podpůrné systémy, jako například klimatizaci. DE zařízení totiž nezpůsobuje zvyšování teploty okolí
- úspora času - ohřev DE zařízením je několikanásobně rychlejší, čas ohřevu se zkracuje z hodin na minuty
- vysoká energetická účinnost - až 75% elektrického příkonu je přeměněno na teplo v ohřívaném materiálu, což představuje 30% nárůst účinnosti proti konvenčním způsobům ohřevu
- zvýšení kvality produktů - v důsledku rovnoměrného ohřevu vznikne méně zmetků a jakost výrobků je vyšší než při konvenčním ohřevu
- vysoký stupeň automatizace - DE zařízení jsou vybavena automatickými řídicími systémy, které eliminují potřebu dohledu kvalifikovanou osobou, jejíž přítomnost je tak zapotřebí jen v případě mimořádné situace. Technologické parametry procesu je možno přenášet do počítače k vyhodnocení, což má návaznost na systémy řízení kvality ISO
- zrychlení výrobního cyklu - DE zařízení jsou méně poruchová a jejich opravy jsou vzhledem k menším hmotnostem a velikostem částí snadnější, čímž se zkracují výpadky způsobené opravami a údržbou zařízení. Zařízení není třeba před použitím přehřívat, ani jinak připravovat

### 3.5 Používané frekvence

Dielektrický ohřev zahrnuje jak mikrovlnný ohřev, tak ohřev na radiových frekvencích. V obou případech se využívá energie elektromagnetického pole, která rovněž slouží například k přenosu televizních a rádiových signálů, přenosu dat, nebo radiolokaci. Mikrovlny spadají do frekvenčního pásma asi 300 MHz až 300 GHz, které odpovídá vlnovým délkám v rozmezí 1 m–1 mm. Zařízení pro průmyslové aplikace se konstruují podobně jako komerční mikrovlnné trouby pro domácnosti, většinou na celosvětově nejvíce využívané frekvenci okolo 2450 MHz (vlnová délka  $\lambda=12,24$  cm). Často používané je také pásmo kolem 915 MHz ( $\lambda =32,75$  cm), jehož výhodou je přibližně dvaapůlkrát větší hloubka vniku do ohřívaného materiálu, než jaké se dosahuje u frekvence 2450 MHz. Pro aplikace vyžadující přesné zacílení vyzařované energie a pouze povrchové působení se využívá pásem 5,8 GHz ( $\lambda =5,17$  cm) a 24,125 GHz ( $\lambda =1,36$  cm). Mikrovlnná energie zpravidla vniká do hloubky v řádu jednotek až desítek centimetrů. Nejvýhodnější je jí používat k ohřevu materiálů, jejichž ztrátový činitel je menší než 0,05, a k procesům, při nichž se požaduje vysoká hustota výkonu. Je to dáno tím, že při jejich použití nedochází ke vzniku elektrického oblouku a spálení materiálu tak často jako u radiových frekvencí. Při použití radiových frekvencí v pásmech 13,56; 27,12 a 40,68 MHz je možné dosáhnout hloubky vniku až několik metrů. Díky tomu je možné ohřívat produkty větších rozměrů, popřípadě větší počet produktů současně. Z tohoto důvodu se ohřev velmi účelně aplikuje na materiály s vysokým ztrátovým činitelem (např. s vysokým obsahem vody). Navíc při výkonech nad 50 kW je radiofrekvenční ohřev ekonomičtější než mikrovlnný ohřev.

## 4 POUŽITÍ DIELEKTRICKÝCH OHŘEVŮ

Dielektrické ohřívání proniklo do celé řady průmyslových odvětví

- ohřev polymerních materiálů před lisováním (bakelit, fenoplasty, aminoplasty)
- ohřev při výrobě sklolaminátu
- ohřev briket a tablet z dřevoplastů před lisováním
- svařování a „šití“ plastických hmot (PVC, polyvinylacetát, PA, PC, PMMA)

### 4.1 Sušení

Protože mechanismus dielektrického ohřívání je odlišný od konvenčního ohřevu, je odlišný též způsob odvodu vody ze sušených materiálů. Při dielektrickém ohřevu dochází k ohřevu v celém objemu a vlhkost je tedy vytlačována do míst s nižším tlakem, tj. k chladnému povrchu součásti. Na povrchu se nevytváří suchá vrstva, naopak povrch je stále vlhký. Naproti tomu při konvenčním ohřevu se zahřívá nejvíce povrch a vlhkost se na něm odpařuje. Může tak dojít ke vzniku zcela suché vrstvy při povrchu materiálu a tím k přerušování vlhkosti póry materiálu.

Vzhledem k tomu, že voda jako vysoce polární látka velmi dobře absorbuje mikrovlnnou energii, dochází k jejímu rychlému ohřevu a sušení materiálu. Efektivitu procesu zvyšuje též fakt, že ostatní materiály krom vody se zahřívají podstatně méně.



Obr.:5. Pohled do sušící komory sušičky Romill MW L12



## 5 KONSTRUKCE DIELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Mikrovlnná zařízení jsou konstruována pro kontinuální, diskontinuální nebo stacionární ohřev kusových, sypkých, kašovitých nebo tekutých materiálů. Zařízení se skládá z generátoru osazeného zdroji mikrovlnné energie - magnetrony - a dále z ozařovacích komor, v nichž mikrovlnné pole působí na zpracovávaný materiál. Mikrovlnná energie se pomocí vlnovodů převádí do aplikátorů, z nichž je rozptýlena v komoře s cílem dosáhnout optimálního ohřevu — obvykle maximální teplotní homogenity v produktu. Zařízení je dále vybaveno ochrannými a měřicími prvky, řídicí jednotkou, popřípadě dalšími integrovanými systémy, sekcí pro dohřev či chlazení apod. Generátory se zařízením buď tvoří kompaktní celek, nebo jsou v samostatných skříních, které jsou od vlastní komory oddělené.

[5]

### 5.1 Kombinace mikrovlnného a konvenčního ohřevu

Využitím obou metod se efektivnost konvenčního ohřevu zvyšuje až trojnásobně. Mikrovlnný ohřev je možné použít před konvenčním ohřevem, během něj nebo i po něm.

- Při mikrovlnném předehevu se prohřeje vnitřek produktu, díky čemuž je následný konvenční ohřev rovnoměrnější a efektivnější.
- Současná aplikace mikrovlnného a konvenčního ohřevu je výhodná například při sušení. Vzniká tak synergický efekt, při kterém mikrovlny vypuzují vlhkost k povrchu, kde je efektivněji odpařena konvenčními systémy.
- Použití konvenčního ohřevu na začátku procesu je výhodné v případě vysoké počáteční vlhkosti materiálu. Efektivněji se jím docílí její počáteční odpařování a přesun. Navíc u materiálu s obsahem vlhkosti 50 % a více je někdy nežádoucí, aby mikrovlny uvedly vodu do varu. Mikrovlnný ohřev je vhodný až tehdy, poklesne-li vlhkost pod 25 %.

[5]

### 5.2 Spolehlivost

Mikrovlnná zařízení jsou určena k nepřetržitému provozu, přičemž mají jen minimální nároky na odstávku. Jejich správná funkce je především závislá na zdrojích mikrovlnné

energie - magnetronech, které mají omezenou životnost a jsou spotřebním materiálem. Dlouhou životností, ale vyššími pořizovacími náklady, se vyznačují průmyslové typy magnetronů s plynule nastavitelným výkonem, které bývají chlazené vodou. U některých aplikací lze pořizovací cenu za mikrovlnné zařízení výrazně snížit použitím koncepce s komerčními typy magnetronů chlazenými vzduchem, jež jsou sice méně nákladné, ale mají krátkou životnost, a musí se proto často měnit.

[5]

### 5.3 Instalace

Zařízení lze provozovat v zastřešených prostorách bez dalších zvláštních nároků. Obvykle je stačí zapojit do elektřiny a nainstalovat přívod chladicí vody, popřípadě její odtok, a někdy též odsávací zařízení. Pokud zařízení není pevně zabudováno do technologické linky, manipulaci usnadňují pojezdová rejdovací kola. Instalace je náročnější tehdy, jsou-li součástí dodávky vstupní a výstupní transportní či manipulační příslušenství a je-li řídicí systém mikrovlnného zařízení propojen s řízením výroby.

[5]

### 5.4 Kontinuální linky

Umožňují zpracování většiny sypkých i kusových, balených nebo volně ložených produktů. Při ohřevu produkty na dopravním pásu projíždějí tunelem tvořeným jednou nebo více komorami. Tímto způsobem je ale možné zpracovávat materiál jen do určitého rozměru, jenž je limitován maximální možnou výškou tunelu. Ta je omezena proto, aby se zabránilo vyzáření do okolního prostoru. Kvůli nežádoucímu vyzáření se na vstup a výstup instalují tzv. tlumivky.

Na kontinuálních linkách lze taktéž zpracovávat pastovité suspenze, které se přepravují v potrubí pomocí šneku či spirály, nebo tekutiny, jež potrubím protékají. Tímto způsobem se dosahuje vysoké teplotní homogenity v celém objemu materiálu. Tepelné dávky se regulují ovlivňováním rychlosti transportu a velikosti vyzářeného výkonu.

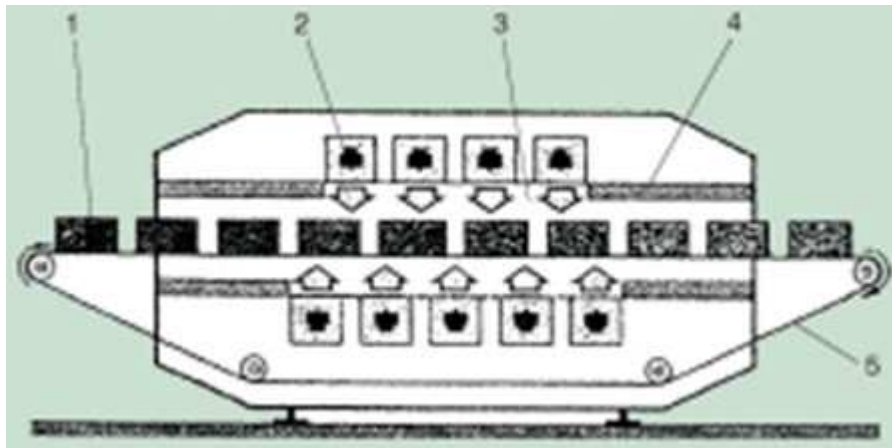
Mikrovlnné komory mohou být doplněny prvky horkovzdušných systémů, ventilací, chlazením atp. Tak lze např. pomocí soustavy škrticích klapek pro regulaci přívodu a odvodu vzduchu v jednotlivých komorách dosáhnout kombinace teplotních režimů (náhřev – proprařování – sušení). Používá se však i obrácený způsob, kdy se průběžná mikrovlnná komo-

ra integruje do existující linky s konvenčním systémem nebo se předradí na její vstup či doplní na konec.

[5]



Obr.:6. Mikrovlnná pásová sušička



Obr.:7. Mikrovlnné tunelové ohřívací zařízení

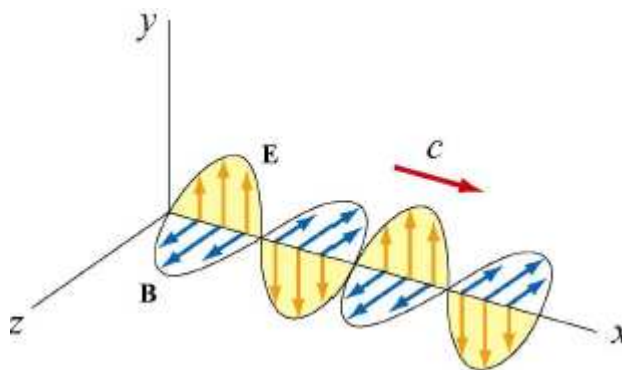
## 6 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

Elektromagnetickým polem nazýváme prostor, v němž elektrický náboj působí na jiné náboje. Je to pole, které se skládá z pole elektrického a magnetického, které jsou spolu úzce provázány. Nelze jej striktně rozdělit na elektrické a magnetické pole, neboť toto dělení je relativní a záleží na volbě souřadného systému. Magnetické pole je totiž definováno v takovém souřadném systému, vzhledem k němuž jsou náboje a magnety v klidu. Pohybující se elektrické náboje totiž znamenají elektrický proud a ten poté vyvolává magnetické účinky. Stejně tak magnet při pohybu vyvolává ve svém okolí elektrické pole.

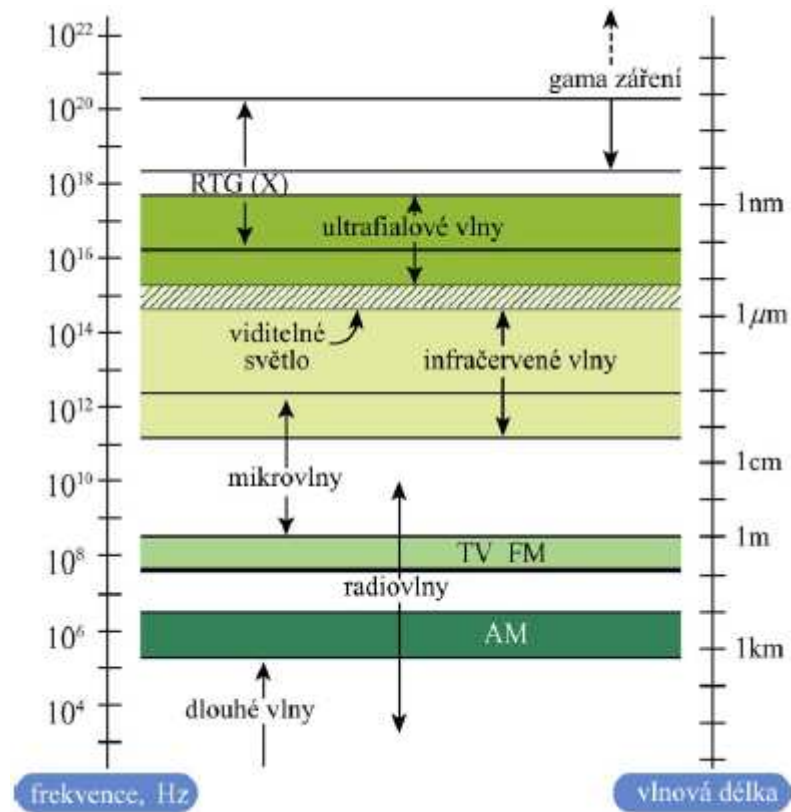
Elektromagnetické pole přitom v žádném případě není čistou energií. Kromě toho, že je nositelem energie je též nositelem hybnosti, hmoty i momentu hybnosti. Lze tedy říct, že elektromagnetické pole má všechny základní vlastnosti částic. Může předávat svou energii, hmotu, hybnost i moment hybnosti částicím ve svém okolí (tj. v elektromagnetickém poli). Přitom vztahy mezi uvedenými veličinami elektromagnetického pole jsou obdobné vztahům platným u částic. Například vztah mezi energií a hybností elektromagnetického pole je stejný jako příslušný vztah u relativistické částice, nebo soustavy částic s nulovou klidovou hmotou.

Elektromagnetický rozruch se šíří z místa vzniku rychlostí světla ve formě vlnění. Stejnou rychlostí dochází k přenosu energie, hmoty, hybnosti a momentu hybnosti, které jsou vlnou nesené.

Síla, kterou elektromagnetické pole působí na elektricky nabitě protony a elektrony v atomech se nazývá elektromagnetická síla. Elektromagnetické vlny splňují princip superpozice.



Obr.:8. Rovinná elektromagnetická vlna šířící se v kladném směru osy x



Obr.:9. Elektromagnetické spektrum

## 6.1 Základní vztahy

### 6.1.1 Hustota elektrického náboje

Pokud by byl elektrický náboj v tělese rozdělen rovnoměrně, byla by hustota elektrického náboje dána vztahem:

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (10)$$

kde:

$\rho$  - hustota elektrického náboje [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$Q$  - elektrický náboj [C]

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

Pokud náboj rovnoměrně rozdělen není, můžeme vzít element objemu  $dV$  a určit množství náboje v něm.

$$dQ = \rho dV \quad (11)$$

kde:

$dQ$  - množství elektrického náboje v elementu objemu [J]  
 $\rho$  - hustota elektrického náboje [ $J \cdot m^3$ ]  
 $dV$  - element objemu [ $m^3$ ]

Elektrický náboj se zachovává v celém tělese, v každém jeho místě a v každém časovém okamžiku. Tento vztah vyjadřuje rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

kde:

$\rho$  - hustota elektrického náboje [ $J \cdot m^3$ ]  
 $t$  - čas [s]  
 $J$  - proudová hustota [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $x, y, z$  - poloha

### 6.1.2 Intenzita elektrického a magnetického pole

Intenzita elektrického pole  $E$  je definována jako síla, kterou působí náboj  $Q$  na jiný náboj ve svém okolí. Závisí na místě a čase.

$$E = \frac{F_e}{Q} \quad (13)$$

kde:

$E$  - intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]  
 $F_e$  - elektrická síla [N]  
 $Q$  - elektrický náboj [C]

Na jednotku objemu náboje působí síla:

$$f_e = \frac{\partial F_e}{\partial V} \quad (14)$$

kde:

$F_e, f_e$  - elektrická síla [N]  
 $V$  - objem [ $m^3$ ]

Intenzita magnetického pole je definována za pomoci magnetických účinků elektrického proudu. Ten totiž vyvolává ve svém okolí magnetické účinky, jimiž působí na proudovodiče. Pokud se nepohybující se proudovodič ocitne v magnetickém poli, na každý jeho element působí jistá síla  $dF_m$ , která je přímo úměrná veličině  $JdV$ . Při natáčení elementu  $dV$

proudovodiče se mění velikost a směr síly  $dF_m$  jako  $\sin \nu$ , přičemž síla je vždy kolmá na směr vektoru proudové hustoty  $J$ . Velikost síly můžeme vyjádřit definiční rovnicí:

$$f_m = \frac{\partial F_m}{\partial V} = \frac{1}{c} J \times H \quad (15)$$

kde:

$c$  - rychlost světla [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$F_m$  - síla na proudovodič [N]

$V$  - objem [ $m^3$ ]

$J$  - proudová hustota [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

$H$  - intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]

Celková hustota síly  $f$  působící na náboje a proudy v elektromagnetickém poli je rovna součtu:

$$f = f_e + f_m = \frac{\partial F_e}{\partial V} + \frac{\partial F_m}{\partial V} \quad (16)$$

### 6.1.3 První Maxwellova rovnice

Základní vztahy v teorii elektromagnetického pole jsou dány Maxwellovými rovnicemi. Lze je zapsat v integrálním tvaru (popisuje pole v jisté oblasti), nebo v diferenciálním tvaru (popisuje pole v určitém bodě).

První Maxwellova rovnice je nazývána zákon celkového proudu neboli zobecněný Ampérov zákon. Zápis v integrálním tvaru:

$$\oint_c H \cdot dl = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (17)$$

kde:

$\psi$  - tok indukce elektrického pole [ $As^{-1}$ ]

$I$  - celkový elektrický proud [A]

$H$  - intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna součtu celkového vodivého proudu  $I$  a posuvného proudu, zpřažený křivkou  $c$ .

Zápis v diferenciálním tvaru:

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (18)$$

kde:

$H$  - intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]

$j$  - hustota vodivého proudu [ $A \cdot m^{-2}$ ]

$\partial D / \partial t$  - hustota posuvného Maxwellového proudu

Rotace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  je rovna hustotě vodivého proudu  $j$  a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu.

### 6.1.4 Druhá Maxwellova rovnice

Zákon elektromagnetické indukce neboli Faradayův indukční zákon.

Zápis v integrálním tvaru:

$$\oint_c E \cdot dl = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (19)$$

kde:

$\Phi$  - magnetický indukční tok [Wb]

$dl$  - element křivky [m]

$E$  - intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]

Cirkulace vektoru intenzity  $E$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku zpraženého křivkou  $c$ . Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Diferenciální tvar:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (20)$$

kde:

$B$  - magnetická indukce [T]

$E$  - intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]

Rotace vektoru intenzity elektrického pole  $E$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukce  $B$ .



### 6.1.5 Třetí Maxwellova rovnice

Je nazývána Gaussovým zákonem elektrostatiky. Integrální tvar:

$$\oint_S D \cdot dS = Q \quad (21)$$

kde:

D - elektrická indukce [C.m<sup>-2</sup>]

dS - element plochy [m<sup>2</sup>]

Q - celkový volný elektrický náboj [C]

Elektrický tok libovolnou vně orientovanou plochou S je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti V ohraničené plochou S.

Diferenciální tvar:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (22)$$

Divergence vektoru elektrické indukce D je rovna objemové hustotě volného náboje  $\rho$ . Ekvivalentní formulace: siločáry elektrické indukce začínají nebo končí tam, kde je přítomen elektrický náboj.

### 6.1.6 Čtvrtá Maxwellova rovnice

Zákon spojitosti indukčního toku. Integrální tvar:

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (23)$$

kde:

B - magnetická indukce [T]

dS - element plochy [m<sup>2</sup>]

Magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou S je roven nule.

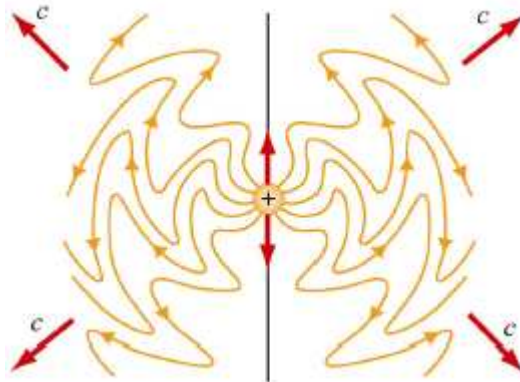
Diferenciální tvar:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (24)$$

Divergence vektoru magnetické indukce B je rovna nule.

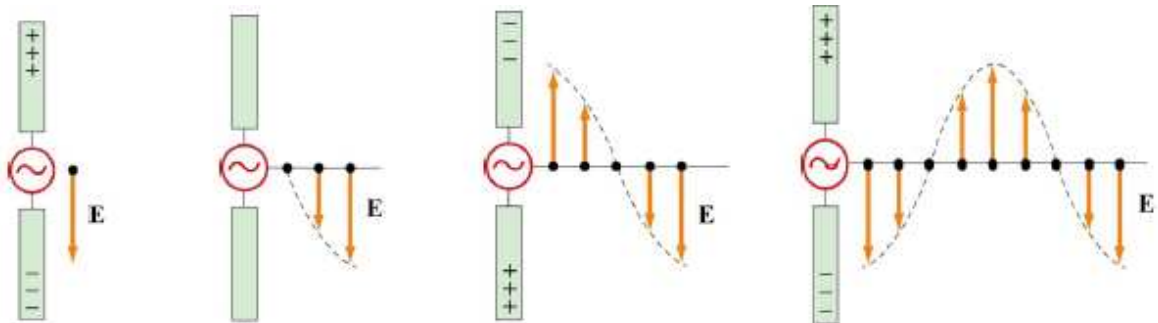
## 6.2 Vznik elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny vznikají urychlováním elektrických nábojů. Nehybný náboj, ani stejnosměrný proud vyzařovat nemůže.



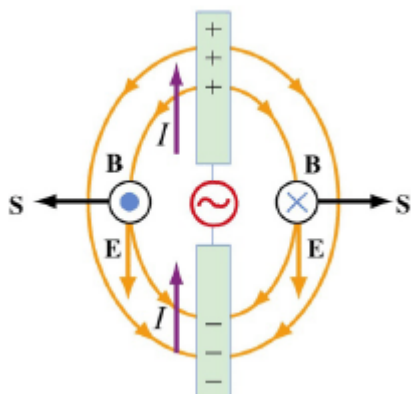
Obr.:10. Siločivky elektrického pole generovaného oscilujícím nábojem

Elektromagnetické vlny lze snadno získat přivedením střídavého napětí na anténu. Náboje se shromažďují na koncích antény a při změně polarity se přesunují, čímž se generuje elektrické dipólové vlny.



Obr.:11. Dipólová anténa generující elektrické pole

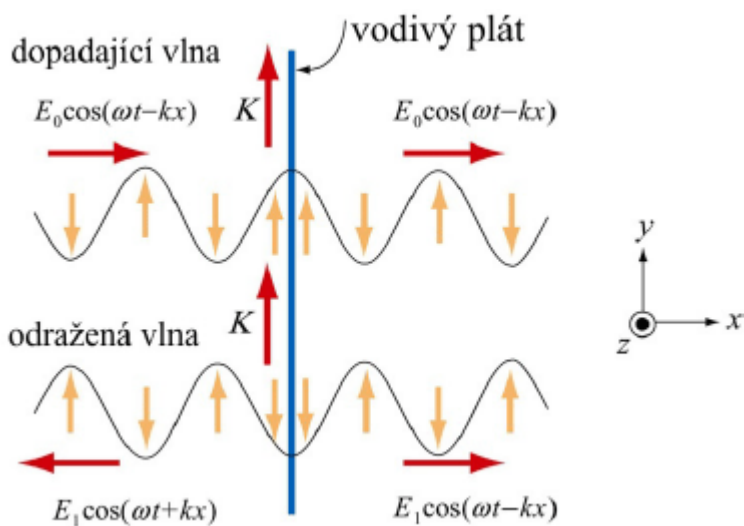
Na počátku jsou kladné náboje shromažděny v horní větvi antény, v dolní je pak stejné množství záporných nábojů. Elektrické pole  $\mathbf{E}$  v blízkosti antény míří směrem dolů. Po uplynutí  $1/4$  periody elektrické pole na krátkou chvíli vymizí a s obracející se polaritou náboje se náboje přesunují na opačný konec antény. Po uplynutí  $1/2$  periody je směr elektrického pole v blízkosti antény opačný, než byl na počátku. Oscilací elektrických nábojů zde tedy vzniká elektrické pole, které se od antény šíří rychlostí světla. Ovšem pohyb nábojů má za následek vznik elektrického proudu a ten pak generuje magnetické pole, které obtáčí tyče antény.



Obr.:12. Křivky elektrického (E) a magnetického (B) pole vytvořených dipólovou anténou.

### 6.3 Odraz elektromagnetických vln od vodivé desky

Pokud elektromagnetické pole dopadne na povrch velmi dobrého elektrického vodiče, vybudí v něm oscilující proud, který je popsán Ohmovým zákonem. Vzniklá proudová plocha pak generuje nové vlny, které se šíří na obě strany. Jedna z těchto generovaných vlny je odražená vlna, která se šíří zpět do směru, ze kterého původní vlna přišla a to se stejnou amplitudou. Druhá vlna pak zcela vyruší vlnu, která na vodivou desku dopadá.



Obr.:13. Odraz elektromagnetických vln od vodivé desky

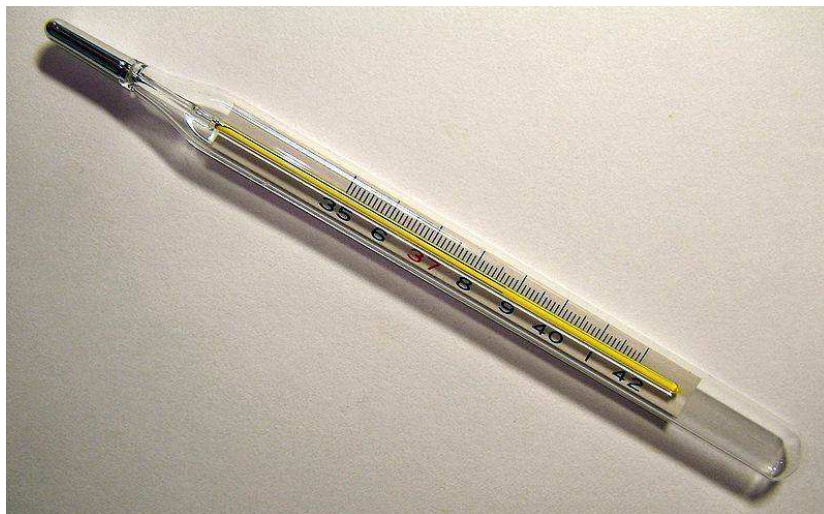
## 7 MĚŘENÍ TEPLoty

Měřením teploty se zabývá obor zvaný Termometrie. Přístroj pro měření teploty se nazývá teploměr a bývá nejčastěji založen na principu měření teplotní dilatace látek.

### 7.1 Kapalinový teploměr

Teploměr se skládá z tenké kapiláry naplněné nejčastěji rtutí. Ta se při změně teploty rozpíná či smršťuje, skrze stěnu kapiláry je možno pozorovat výšku hladiny rtuti a na stupnici tak přímo odečítat hodnotu teploty ve stupních Celsia či Fahrenheita. Nevýhodou těchto teploměrů je zdravotní závadnost rtuti a také její škodlivost pro životní prostředí. Rtuť je toxická a patří mezi tzv. kumulativní jedy. Skleněná kapilára se snadno rozbije neopatrnou manipulací, nebo překročením maximální pracovní teploty a rtuť kontaminuje životní prostředí.

Díky elektrické vodivosti rtuti je možno zkonstruovat spínací teploměr, který obsahuje elektrický spínač, který sepne při dosažení určité teploty. Použití pro regulaci teploty.



Obr.:14. Lékařský rtuťový teploměr

### 7.2 Bimetalový teploměr

Využívá rozdílné teplotní roztažnosti dvou různých kovů. Z nich jsou vyrobeny tenké pásy a válcováním spojeny k sobě. Při zahřívání teploměru se pak pásek deformuje (ohýbá) a tento pohyb je pak mechanicky přenášen na ručičku se stupnicí. Bimetalické teploměry jsou mechanicky odolné, fungují i v kapalinách a lze měřit velký rozsah teplot. Na druhou

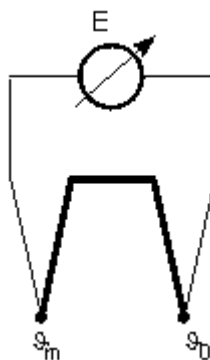
stranu jsou však méně přesné než kapalinové teploměry a nehodí se k pohotovému měření, neboť k deformaci bimetalu dochází pomalu.



Obr.:15. Bimetalový teploměr

### 7.3 Termoelektrický teploměr

Tento teploměr využívá termoelektrického jevu, kdy dochází k přímě přeměně rozdílu teplot na elektrické napětí. Termočlánek bývá obvykle vyroben z tenkého vodiče o průměru 0,1 - 0,5 mm, které jsou na konci svařeny a uloženy v keramické dvojkapiláře. Napětí článku se obvykle měří kompenzátořem nebo jiným citlivým přístrojem na jednosměrný proud. Závislost mezi teplotou a elektrickým napětím však není lineární.



Obr.:16. Zapojení termočlánku

### 7.4 Odporový teploměr

Tento teploměr využívá změny elektrického odporu kovu (teploměry) nebo keramickém polovodiči (termistory) při změně teploty. Teploměry vykazují v podstatě lineární závislost teplota-odpor, při měření termistorem pak odpor klesá nelineárně s rostoucí teplotou.

## 7.5 Bezdotykový infračervený teploměr

Tento teploměr byl dříve označován jako pyrometr či radiační teploměr a sloužil pro měření vysokých teplot v malém prostoru, kde z různých důvodů nebylo možno použít kontaktní teploměry. Sloužil pro měření teplot tavenin kovů, v cementárnách, vápenkách či sklárnách. S postupným vývojem elektroniky a optiky se však infračervený teploměr používal při stále nižších teplotách a dnes lze měřit i záporné teploty. Jeho princip je založen na vyhodnocování tepelného záření těles. Často bývá doplněn laserovým zaměřovačem jako pomůckou ke správnému zacílení senzoru.

Použití:

- kontrola mechanických součástí (detekce zvýšeného tření ložisek)
- kontrola elektrických obvodů (vyhledání studených spojů)
- detekce ohniska požáru
- kontrola tepelné izolace budov (hledání tepelných mostů)

Teploměr se skládá z optické soustavy, která koncentruje přijaté teplo do detektoru, který převádí teplo na elektrický signál, který se po kompenzaci podle okolní teploty zobrazí na displeji. Podmínkou je správné nastavení emisivity měřeného povrchu. V opačném případě teploměr při měření lesklých předmětů ukazuje vyšší než skutečnou teplotu. Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě a závisí na materiálu a jeho povrchové úpravě. Emisivita černého tělesa je rovna 1. U komerčně dostupných teploměrů je nastavena univerzální emisivita 0,95, kterou lze použít pro velkou většinu měření.



Obr.:17. Infračervený teploměr Voltcraft IR-360

## 8 MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY

### 8.1 Permittivita

Permittivita je fyzikální veličina popisující vztah mezi vektory elektrického pole a elektrické indukce daného materiálu. Určí se ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (25)$$

kde:

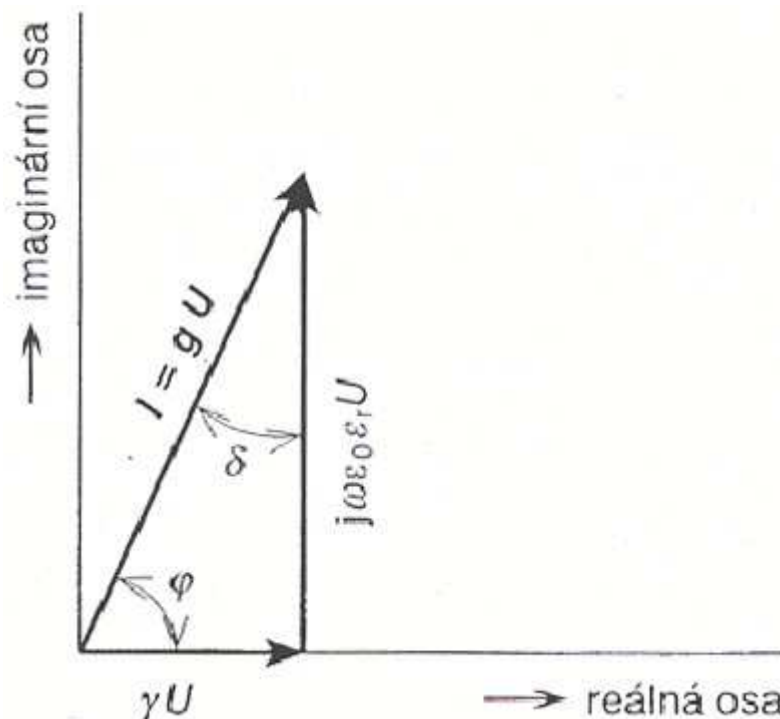
$\varepsilon$  - permittivita [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$D$  - elektrická indukce [ $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$E$  - intenzita elektrického pole [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

[6]

Permittivita vakua je smluvně ujednána na hodnotě  $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ . Permittivita není konstanta, její velikost závisí na aplikované frekvenci, teplotě, vlhkosti a dalších parametrech. Skládá se z reálné ( $\varepsilon'$ ) a imaginární ( $\varepsilon''$ ) části. Z fázového diagramu dielektrických ztrát vyplývá jejich vzájemný vztah.



Obr.:18. Fázový diagram dielektrických ztrát

[10]

## 8.2 Relativní permitivita

Jako relativní permitivita (dielektrická konstanta) se označuje podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua, tedy:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (26)$$

kde:

$\varepsilon_r$  - relativní permitivita [-]

$\varepsilon$  - permitivita [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\varepsilon_0$  - permitivita vakua [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Relativní permitivita je látková konstanta, která vyjadřuje, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí (též kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum).

Relativní permitivita je bezrozměrná veličina.



## 9 SHRNU TÍ STUDIJNÍ ČÁSTI

Z literární studie vyplývá, že DE ohřev je velmi účinný, rychlý, bezpečný a klade menší ekonomické nároky než konvenční metody ohřevu. Na českém trhu jsou zavedeny specializované firmy dodávající potřebnou infrastrukturu. V dříve obhájených akademických pracích bylo prokázáno, že DE ohřev nemá na kaučukovou směs negativní vlivy. Dalším krokem ve studiu této problematiky je studie rozložení teplotních polí v ohřívaných materiálech, což je obsahem praktické části této DP.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## CÍL EXPERIMENTU

V současné době jsou kaučuky před zpracováním předeřívány především v horkovzdušných systémech. Konvenční ohřev však způsobuje řadu problémů zejména v oblasti zvýšených stavebních a energetických nároků. Jedna z dalších alternativ předeřívání kaučuku se jeví možnost využití DE ohřevu.

Cílem této diplomové práce je zjištění podmínek DE ohřevu vybraných druhů kaučuku změřením všech potřebných materiálových konstant definujících působení DE pole na materiál za normální i snížené teploty.

Pro porovnání proveďte stejné experimenty s kaučuky v podmínkách horkovzdušného ohřevu. Chování materiálu při konvenčním a DE ohřevu poté porovnejte.

Změřte měrnou tepelnou kapacitu a relativní permitivitu jednotlivých kaučuků.

## 10 KONVENČNÍ PŘEDEHŘEV KAUČUKU

Simulaci konvenčního ohřevu byla provedena v horkovzdušných zařízeních. Zde dochází k přestupu tepla mezi horkým vzduchem a kaučukem. Teplo se dále materiálem šíří vedením.

### 10.1 Použitá zařízení

Konvenční ohřev se uskutečnil ve dvou horkovzdušných zařízeních.

- typ Chirana STE 39, příkon 2 200 W, vnitřní rozměry (v x š x h) 440 x 550 x 350 mm



Obr.:19. Horkovzdušné zařízení Chirana STE 39

- typ MORA 4807, příkon 3 500 W



Obr.:20. Horkovzdušné zařízení MORA 4807

K měření teplot použity dva typů dotykových teploměrů pro měření pod povrchem a v jádře vzorků a jeden bezdotykový pro měření teploty povrchu.

- typ THERM 2220, měřicí rozsah  $-70$  až  $+500^{\circ}\text{C}$ ,  $\varnothing$  čidla 2 mm, dílek  $1^{\circ}\text{C}$
- typ Testo 110, měřicí rozsah  $-50$  až  $+150^{\circ}\text{C}$ ,  $\varnothing$  čidla 5 mm, dílek  $0,1^{\circ}\text{C}$

## 10.2 Postup měření

Z kaučukových bloků byly nařezány vzorky ve tvaru krychle.

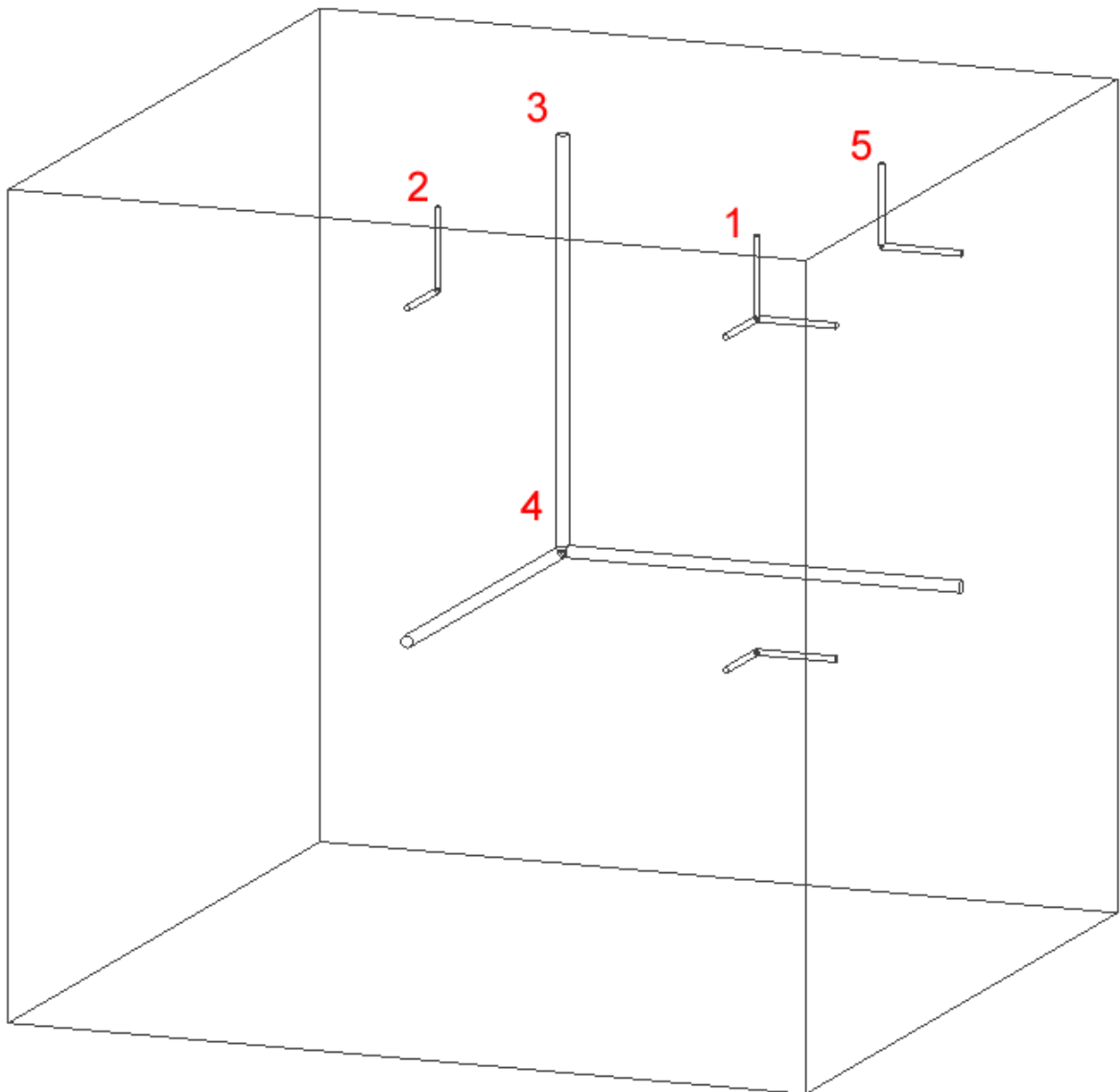
materiál	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3
SMR 10 MR11	871,6 g	873,7 g	889,7 g
RSS 3	1 738,1 g	858,2 g	862,3 g
SMR 20 BD	1 900 g	1 628,7 g	1 937,4 g
SMR 10 MR 9	1 432,4 g	1 410,2 g	1 469,5 g
STR 20 SED	849 g	841,9 g	873,9 g

Tabulka 1: Seznam vzorků určených pro konvenční ohřev

Vzorky byly vloženy do horkovzdušného zařízení předehřáté na teplotu  $70^{\circ}\text{C}$ . V intervalu 20-ti minut byl vzorek na dobu 4 minut vyjmut a byly změřeny teploty pod povrchem a v jádru vzorku. Teplota povrchu byla měřena přímo v zařízení ještě před vyjmutím vzorku. Po uplynutí zhruba 120 minut se teplota povrchu ustálila na hodnotě blízké teplotě vzdu-

chu v horkovzdušném zařízení a dále již jen kolísala podle momentální intenzity ohřevu nespojitě regulovaného zařízení.

Body měření byly voleny tak, aby bylo možno z naměřených hodnot rekonstruovat teplotní pole v celém vzorku. Rozložení jednotlivých měřících pozic na vzorku je zachyceno na následujícím schématu.



Obr.:21. Schéma rozmístění měřících bodů na vzorku

Měření teploty povrchu bylo prováděno v místě označeném číslem 1. Pozice 1, 2, 3 a 5 byly měřeny teploměrem THERM 2220 zavedeným do hloubky 1 cm pod povrch. Vyrovnání teplot proběhlo během několika vteřin. Pozice 4 (jádro) byla měřena teploměrem Testo 110 zapíchnutým do hloubky 5 cm pod povrch. Ke snížení tření během zavádění teploměrů byla použita voda. Vyrovnání teplot proběhlo zhruba během jedné minuty. Měření

teploty jádra bylo tedy časově dosti náročné a v některých případech bylo třetí měření vynecháno. Tím se omezilo ochlazení vzorku a umožnilo lepší dodržování měřicích intervalů. Během měření byl vzorek položen na polystyrenové podložce a při vyšších teplotách vzorku byl též alespoň částečně zakryt pokrývkou.



Obr.:22. Měření teplot vzorků

## 11 DIELEKTRICKÝ PŘEDEHŘEV

Hlavní částí mojí práce bylo studium rozložení teplotních polí při DE ohřevu.

### 11.1 Použité zařízení

K DE ohřevu jsem použil laboratorní zařízení, které bylo sestaveno v rámci [9]. Základní část tvoří komerční mikrovlnná trouba typu PROFESSOR MTE-235BX:

- výkon 900 W
- příkon 1 400 W
- objem mikrovlnné komory 23 l
- vnitřní rozměry komory (v x š x h) 215 x 350 x 330 mm

Toto zařízení bylo posíleno druhým průmyslovým zdrojem mikrovln od firmy Romill:

- výkon 900 W
- příkon 1 100 W

### 11.2 Kontrolní měření

Ještě před započítím měření bylo provedeno kontrolní ohřev, při němž byl ověřen výkon a stabilita celého mikrovlnného zařízení. Jako zátěž byl použit 1 litr vody v nádobě z varného skla. Tato zátěž byla následně ohřívána za použití jednotlivých zdrojů při nastavení 100% výkonu. Ve 1 až 2 minutových intervalech byla teplota vody změřena dotykovým teploměrem. Měření bylo ukončeno po dosažení teploty vody cca 95 °C. Naměřené hodnoty při měření číslo 1 příliš vybočují, a proto nebyly zahrnuty do výsledků. Rychlejší ohřev byl v tomto případě zřejmě důsledkem známé vlastnosti zdroje Professor, tzv. vadnutí, které se projevuje tak, že se výkon zdroje po určité době chodu sníží.

čas [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
měření č.1	8,1		27,3		47,1		65,2		79,6		91,4	96,4		
měření č.2	8,1		24,5		42,5		60,3		74,0		86,7	91,3	95,7	
měření č.3	8,1		24,2		42,0		58,8		72,0		85,7	89,9	94,1	
měření č.4	8,1		23,8		41,2		58,3		72,4		84,2	89,1	93,2	96,6
průměr	8,1		24,2		41,9		59,1		72,8		85,5	90,1	94,3	96,6
sm.odchylka	0,00		0,29		0,54		0,85		0,86		1,03	0,91	1,03	0,00

Tabulka 2: Kontrolní měření zdroje Professor



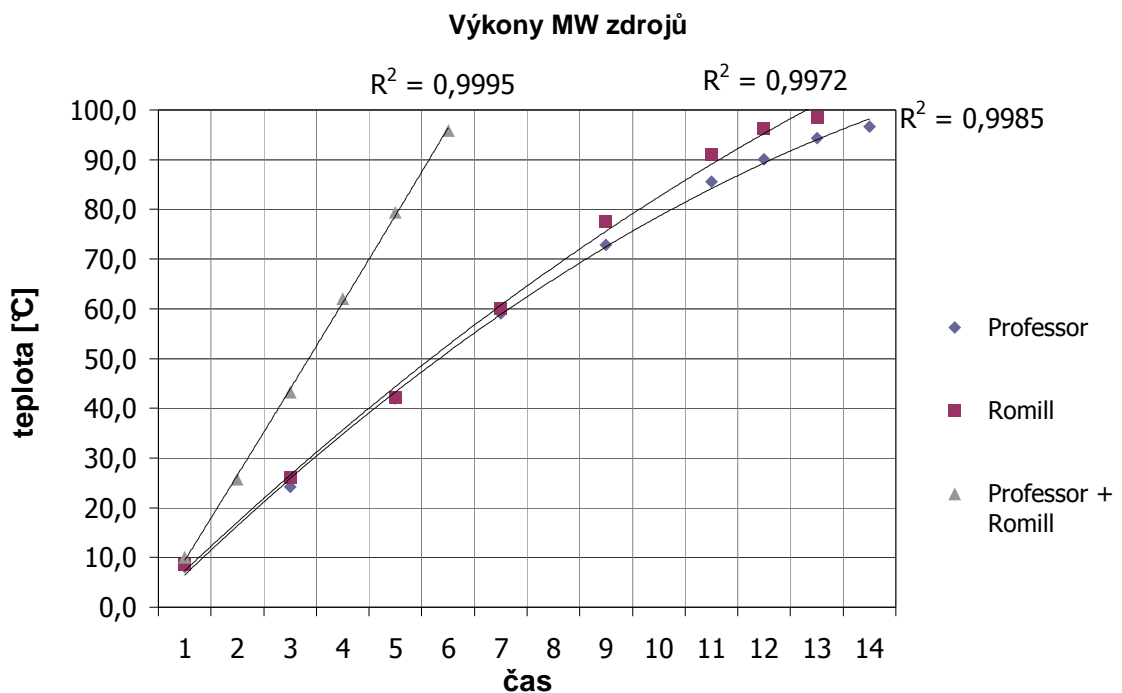
čas [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
měření č.1	10,9		29,4		45,0		63,1		80,2	85,9	91,1	97,6		
měření č.2	7,5		22,4		40,2		56,1		74,2		91,2	95,2	98,6	
měření č.3	7,5		26,1		41,3		60,6		77,9		90,9	96,1	98,4	
průměr	8,6		26,0		42,2		59,9		77,4		91,1	96,3	98,5	
sm.odchylka	1,60		2,86		2,05		2,90		2,47		0,12	0,99	0,10	

Tabulka 3: Kontrolní měření zdroje Romill.

čas [min]	0	1	2	3	4	5
měření č.1	10,0	26,8	42,8	62,0	79,2	95,2
měření č.2	10,0	25,1	43,3	62,5	79,8	96,3
měření č.3	10,0	25,2	43,6	61,5	79,1	96,1
průměr	10,0	25,7	43,2	62,0	79,4	95,9
sm.odchylka	0,00	0,78	0,33	0,41	0,31	0,48

Tabulka 4: Kontrolní měření zdrojů Professor + Romill

Naměřené hodnoty jsem zakreslil do grafu a body proložil polynomicou křivkou 2. řádu.



### 11.2.1 Ověření výpočtem

Výkon obou mikrovlnných zdrojů lze vypočítat na základě vztahu:

$$P = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{t} \tag{27}$$

kde:

P - výkon [W]

m - hmotnost vody [kg]

$c_p$  - měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\Delta T$  - rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotu [K]

t - čas [s]

Professor 100%		Romill 100%		Professor + Romill 100%	
	výkon [W]		výkon [W]		výkon [W]
měření č.2	527	měření č.1	549	měření č.1	1187
měření č.3	518	měření č.2	555	měření č.2	1202
měření č.4	513	měření č.3	561	měření č.3	1200

Tabulka 5: Výkon mikrovlnných zdrojů

Z výsledků vyplývá, že přestože oba zdroje mají shodný štítkový výkon 900 W, zdroj Romill vykazuje v průměru o 6,5% vyšší výkon, což je způsobeno jeho vyšší účinností a částečně též odlišným rozložením elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné komory, což bylo zkoumáno v [9].

### 11.3 Ohřev kaučuků o normální teplotě

Z kaučuku byly nařezány vzorky o tvaru krychle a délce strany 100 mm. Tyto byly poté ohřívány v mikrovlnném zařízení z počáteční teploty 23,3°C. Zapojeny byly oba zdroje a to na 40% maximálního výkonu. Ve tříminutových intervalech byl vzorek vyjmut a pomocí dotykového teploměru Testo změřena teplota v jeho jádře. Kvůli pozvolnému vyrovnání teplot čidla a kaučuku trvalo jedno měření asi 1 minutu. Aby bylo zabráněno možnému poškození mikrovlnného zdroje (magnetronu) zpětnými rázy, bylo do mikrovlnné komory kromě ohřívání vzorku vloženo též 0,8 l vody ve skleněné nádobě. Po každém tříminutovém cyklu byla voda vyměněna.



Obr.:23. Zařízení pro MW ohřevu vzorků

materiál	vzorek	čas [min]							
		0	3	6	9	12	15	18	21
SMR 10/MR11	B	23,3	33,4	43,7	55,1	71,7	83,3		
	D	23,3	32,9	42,3	52,2	63,7	78,8	88,3	
	F	23,3	31,1	38,8	46,6	56,0	67,6	77,5	82,9
RSS 3	C	23,3	33,3	47,2	65,7	83,1			
	D	23,3	35,7	45,5	57,7	70,0	85,5		
	E	23,3	33,5	44,6	56,1	70,9	86,1		
STR 20 BD	B	23,3	39,8	54,2	71,0	84,4			
	D	23,3	35,9	46,2	57,6	69,3	82,7		
	F	23,3	35,9	47,8	60,1	73,4	89,3		
SMR 10/MR 9	B	23,3	43,0	63,0					
	D	23,3	40,5	55,4	75,2	92,7			
	F	23,3	32,9	42,4	51,3	61,4	73,5	85,6	
STR 20 SED	C	23,3	38,2	48,8	61,9	76,9	90,3		
	E	23,3	30,8	40,2	50,9	64,8	75,3	85,2	
	A	23,3	35,5	46,0	61,0	76,6	93,6		

Tabulka 6: Výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty

U jednotlivých vzorků byly zaznamenány značné rozdíly v rychlosti ohřevu. U materiálu **SMR 10/MR 9** vzorek B byla zaznamenána nepříjemná anomálie. Při ohřevu se během 6. minuty na spodní straně vzorku vytvořila výduť o výšce cca 1 cm. Celá spodní strana byla výrazně přehřátá, v hloubce 1 cm pod povrchem byla naměřena teplota 100°C. Následně

byla spodní strana vzorku rozřezána na plátky. Ve střední části byly nalezeny dutiny, které byly patrně vytvořeny rozpínající se vodní párou, která také způsobila přehřátí.



Obr.:24. Dutiny ve vzorku SMR 10/MR 9

Rovněž při ohřevu vzorku D byla rychlost ohřevu nápadně vyšší s občasným dočasným výskytem boulí na spodní straně. Stejná situace nastala při doplňujícím měření dalších kusů téhož materiálu. Do tohoto materiálu se tedy zřejmě při výrobě či zpracování dostala vlhkost, což dielektrický ohřev komplikuje. Proto byl tento materiál z dalšího měření vyloučen.

### 11.3.1 Souhrnné výsledky - teplota

materiál	čas [min]							
	0	3	6	9	12	15	18	21
SMR 10/MR 11	23,3	32,5	41,6	51,3	63,8	76,6	82,9	82,9
RSS 3	23,3	34,2	45,8	59,8	74,7	85,8		
STR 20 BD	23,3	37,2	49,4	62,9	75,7	86,0		
SMR 10/MR 9	23,3	38,8	53,6	63,3	77,1	73,5	85,6	
STR 20 SED	23,3	34,5	44,5	56,4	70,9	82,8	85,2	

Tabulka 7: Souhrnné výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty - teplota

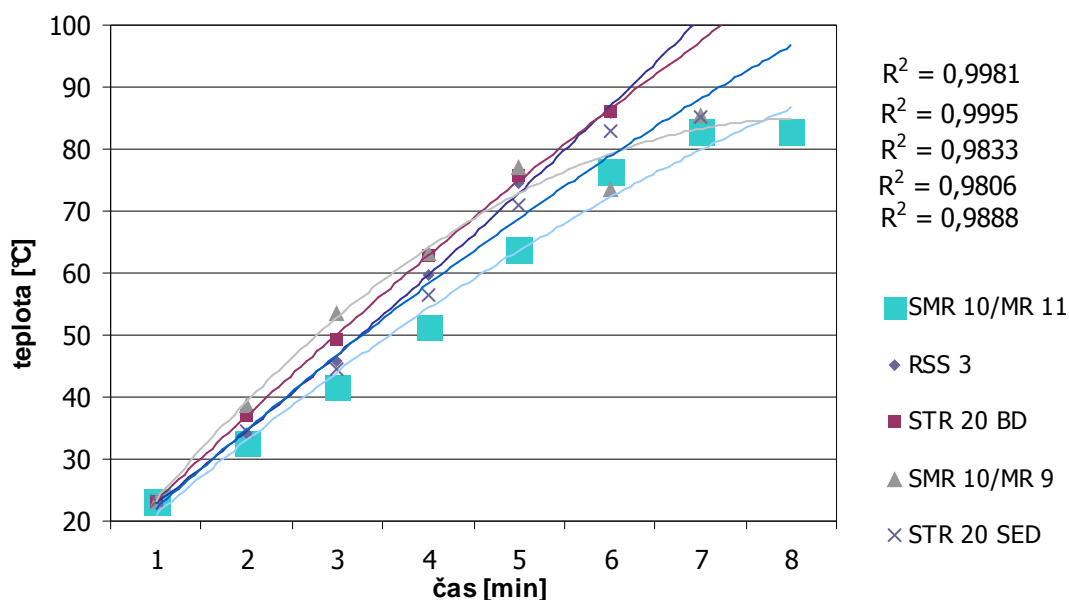
### 11.3.2 Souhrnné výsledky - směrodatná odchylka

materiál	čas [min]								průměr
	0	3	6	9	12	15	18	21	
SMR 10/MR 11	0	1,0	2,1	3,5	6,4	6,6	5,4	0,0	3,1
RSS 3	0	1,1	1,1	4,2	6,0	0,3			2,1
STR 20 BD	0	1,8	3,5	5,8	6,4	3,3			3,5
SMR 10/MR 9	0	4,3	8,5	12,0	15,7	0,0	0,0		5,8
STR 20 SED	0	3,7	4,3	5,5	6,1	7,5	0,0		3,9

Tabulka 8: Souhrnné výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty - směrodatná odchylka

### 11.3.3 Souhrnné výsledky - graf

#### Ohřev kaučukových bloků v MW poli (počáteční teplota 23 °C)



Z grafu je zřejmé, že ohřev všech materiálů s výjimkou vyřazeného SMR 10/MR 9 probíhal lineárně s vysokou hodnotou spolehlivosti R.

### 11.4 Ohřev zmrazených vzorků

Protože v praxi bývají v zimních měsících kaučuky při vstupu do výrobního procesu často zmrazené následkem dlouhé železniční či silniční dopravy, zahrnul jsem do své práce též studii rozložení teplotních polí při ohřevu ze záporných teplot.

### 11.4.1 První série

Kaučukové bloky byly vloženy do mrazáku, kde byla udržována teplota  $-20^{\circ}\text{C}$ . Zde byly po dobu dvou měsíců. Poté byla na těchto vzorcích provedena měření.

čas [min]		teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]											
		0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
SMR 10/MR11	A	-16	-4,4	1,9	5,8	9,6	18,8	29,2	40,2	56,4	71,1	83,3	
STR 10/MR 11	E	-16	-4,3	1,4	4,9	9,9	17,1	24,7	35,5	45,9	57,4	69,7	82,4
STR 10/MR 11	C	-16	-5,2	1,1	5,7	11,8	20,1	32,1	44,6	56,9	77,6	86,0	
RSS 3	F	-16	-3,2	2,8	7,7	17,3	24,1	39,3	53,2	72,0	88,5		
RSS 3	A	-16	-1,8	7,2	12,7	23,0	35,5	48,4	77,0				
STR 20 BD	E	-16	-5,3	1,0	7,0	22,5	32,0	52,3					

Tabulka 9: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - první série

Tato první série měření však spíše než použitelné výsledky přinesla poznání, že kaučuk je při DE ohřevu velmi náchylný na lokální přehřívání. Usoudil jsem, že do volně ložených vzorků se při dlouhém pobytu v mrazáku dostala vlhkost a ta následně při ohřevu zplynovala a vytvářela na stěnách vzorků výdutě. Z některých pórů dokonce bezprostředně po ukončení ohřívacího cyklu vycházela pára.

### 11.4.2 Druhá série

V další sérii měření byly vzorky do mrazáku vloženy v uzavřených sáčcích. Tím byly simulovány obdobné podmínky, jaké jsou při skladování a přepravě průmyslově používaných kaučuků. Ty bývají zabaleny do PE pytlů.





Obr.:25. Vzorek kaučuku zabalený do sáčku

čas [min]		teplota [°C]											poznámky	
		0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30		33
STR 10/MR 11	C	-10,5	-4,0	1,6	5,9	10,5	19,5	32,0	48,0	-	103,0			výduť
STR 10/MR 11	E	-14,0	-5,8	1,0	4,8	10,0	16,9	28,7	37,9	50,7	65,5	76,7	88,6	
RSS 3	F	-10,5	-5,9	1,5	6,5	12,4	22,6	34,4	45,4	63,0	84,2			
RSS 3	B	-10,5	-1,7	7,3	16,6	26,7	43,6	65,3	81,2					
STR 20 BD	E	-14,0	-6,0	1,2	7,5	16,1	26,7	39,4	57,7	70,7	93,8			
STR 20 BD	C	-10,5	-3,1	3,0	6,3	11,2	19,4	30,2	40,9	51,8	62,5	75,6	88,2	
STR 20 SED	F	-10,5	-2,3	3,6	7,5	15,6	28,2	42,0	61,6	86,1				výduť
STR 20 SED	D	-10,5	-0,1	18,0	29,0	51,0	63,4	75,6	93,2					

Tabulka 10: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - druhá série

Ani druhá série však nepřinesla uspokojivé výsledky. Při některých ohřevech se na spodní straně opět objevily lokální přehřátí s výdutěmi, největší z nich na materiálu STR 10/MR 11 vzorek C, viz. obrázek.



Obr.:26. Výduť na vzorku

### 11.4.3 Třetí série

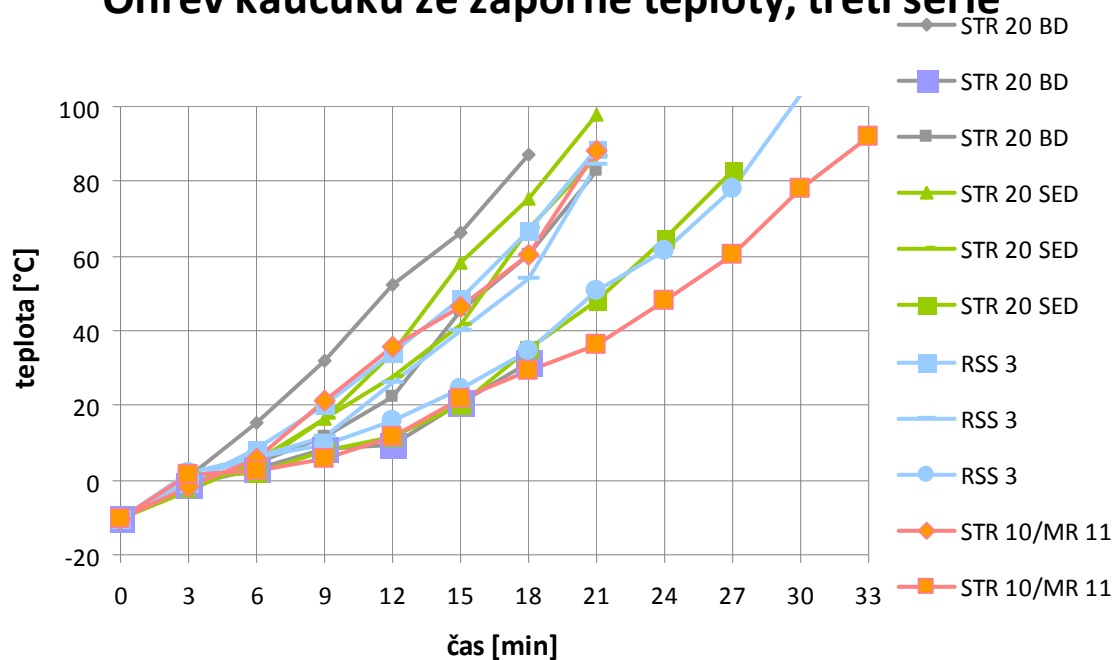
Ve třetí sérii byly vzorky opět zmrazeny v sáčcích a před každým třiminutovým ohřívacím cyklem byl vzorek otočen do jiné polohy. Toto opatření se ukázalo jako klíčové a přehřátá místa ani výdutě se již neobjevily.

čas [min]		teplota [°C]												rel. permit.
		0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	
STR 10/MR 11	C	-10,5	-1,8	5,5	21,4	35,9	46,5	60,1	88,0					2,51
STR 10/MR 11	F	-10,5	1,5	2,7	5,9	11,5	22,0	29,2	36,4	48,1	60,2	78,2	91,7	
RSS 3	B	-10,5	-0,5	8,3	20,0	34,2	48,8	67,0	88,8					
RSS 3	F	-10,5	0,2	6,5	11,6	25,9	39,8	53,8	84,3					3,08
RSS 3	C	-10,5	1,9	6,5	9,4	16,0	24,4	34,5	50,7	61,6	78,2	103,0		2,83
STR 20 BD	C	-10,5	1,1	15,1	32,1	52,1	66,5	87,0						
STR 20 BD	F	-10,5	-1,1	2,9	8,4	9,7	20,7	31,5						
STR 20 BD	D	-10,5	-0,7	4,5	11,8	22,1	45,6	60,2	82,8					
STR 20 SED	D	-10,5	-2,7	5,4	16,6	34,0	58,2	75,6	98,0					
STR 20 SED	F	-10,5	-1,0	4,2	16,3	27,7	41,6	67,5	86,4					
STR 20 SED	A	-10,5	0,7	1,9	8,0	11,8	20,2	35,4	47,8	64,7	82,9			2,95

Tabulka 11: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - třetí série



## Ohřev kaučuků ze záporné teploty, třetí série



Obr.:27. Ohřev kaučuků ze záporné teploty, třetí série

## 12 MĚŘENÍ TEPELNÉ KAPACITY

### 12.1 Kalorimetrická rovnice a použité vybavení

K výpočtu tepelné kapacity jednotlivých kaučuků jsem použil kalorimetrickou rovnici. Ta slouží k popisu tepelné výměny mezi tělesy uvnitř izolované soustavy. Platí zde zákon zachování energie, přičemž se nepředpokládá přeměna na jinou formu energie než tepelnou. Matematicky lze kalorimetrickou rovnici definovat tak, že teplo odevzdané teplejším tělesem se rovná teplu přijatému chladnějším tělesem.

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t_2 - t) \quad (28)$$

kde:

$c_{1,2}$  - měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]

$m_{1,2}$  - hmotnost [kg]

$t_{1,2}$  - počáteční teplota vody a vzorku [ $^\circ\text{C}$ ]

$t$  - teplota po vyrovnání teplot [ $^\circ\text{C}$ ]

K ohřevu vzorků byl použit laboratorní vodní ohříváč. K měření teploty byl použit multimetr Emos MY 64.

K samotnému měření byla použita válcová termónádoba neznámého výrobce a typu (termoska). Uzávěr byl provrtán, aby umožnil zavedení čidla dovnitř.

- vnější průměr 140 mm
- vnitřní průměr 121 mm
- vnitřní výška 145 mm
- výška 204 mm

### 12.2 Průběh měření

Z každého materiálu byl připraven jeden vzorek a ponořením do vodou naplněného odměrného válce byl změřen jeho objem. Poté do něj byl vyvrtán otvor pro zavedení teplotního čidla. Čidlo bylo zavedeno na místo a utěsněno silikonem. Vzorek byl poté vložen do vodního ohříváče temperovaného na teplotu  $90^\circ\text{C}$ . Termoska byla mezitím naplněna přesně 0,5 l vody a změřena její teplota. Po dosažení teploty vzorku  $88^\circ\text{C}$  byl vložen do termosky a uzavřen. Po vyrovnání teplot bylo měření vyhodnoceno a vypočítána měrná te-

plná kapacita daného kaučuku. Měrná tepelná kapacita vody je  $4\,180\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ . Vztah pro výpočet tepelné kapacity:

$$\begin{aligned}c_1 m_1 (t_1 - t) &= c_2 m_2 (t_2 - t) \\ c_2 &= \frac{c_1 m_1 (t_1 - t)}{m_2 (t_2 - t)}\end{aligned}\quad (29)$$



Obr.:28. Měření objemu vzorku v odměrném válci



Obr.:29. Měření tepelné kapacity



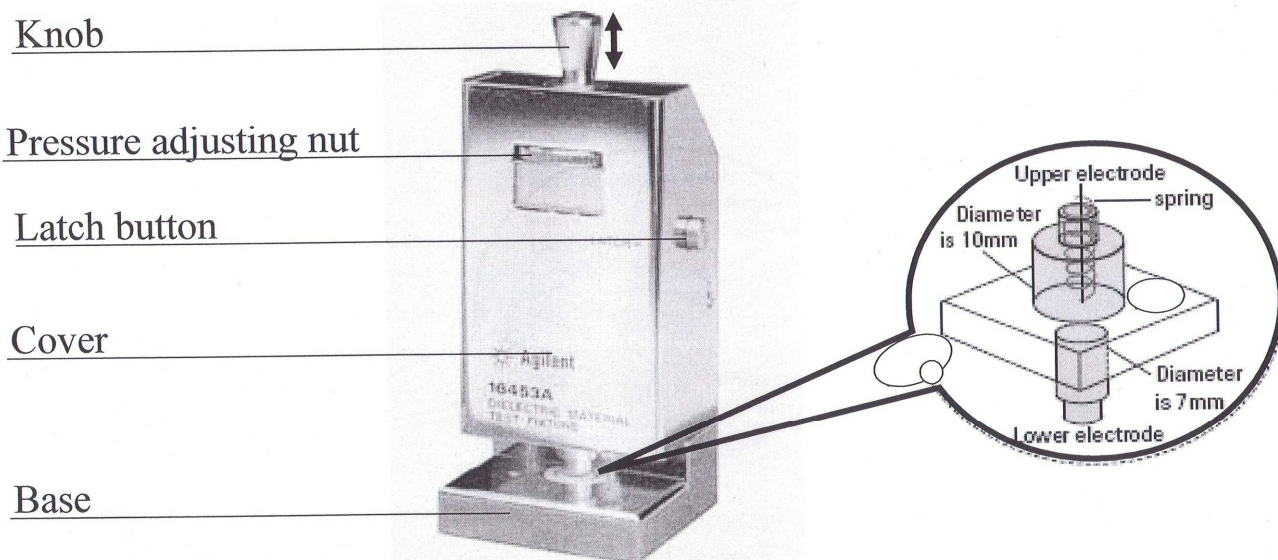
Obr.:30. Vzorek připravený pro měření tepelné kapacity

materiál	hmotnost [kg]	objem vzorku [cm <sup>3</sup> ]	teplota vody [C]		měrná tepelná kapacita kaučuku [J.kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
			počáteční	koncová	
SMR 10/MR11	0,0561	63	21,6	24,0	1 397
RSS 3	0,0604	65	20,8	24,7	2 132
STR 20 BD	0,0619	58	24,2	26,6	1 320
SMR 10/MR 9	0,0515	58	23,3	25,6	1 496
STR 20 SED	0,0604	65	22,4	26	2 009

Tabulka 12: Měření tepelné kapacity kaučuků

## 13 MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY

K měření relativní permitivity byl použit přístroj Agilent 16453A doplněný počítačem E4991-A002. Toto zařízení rychle a snadno změří relativní permitivitu pevných látek, jako jsou polykarbonáty, keramika, nebo polymery. Výsledky graficky zobrazuje a ukládá do datových souborů pro pozdější analýzu.



Obr.:31. Měřicí zařízení pro testování dielektrických materiálů

### 13.1 Příprava vzorků

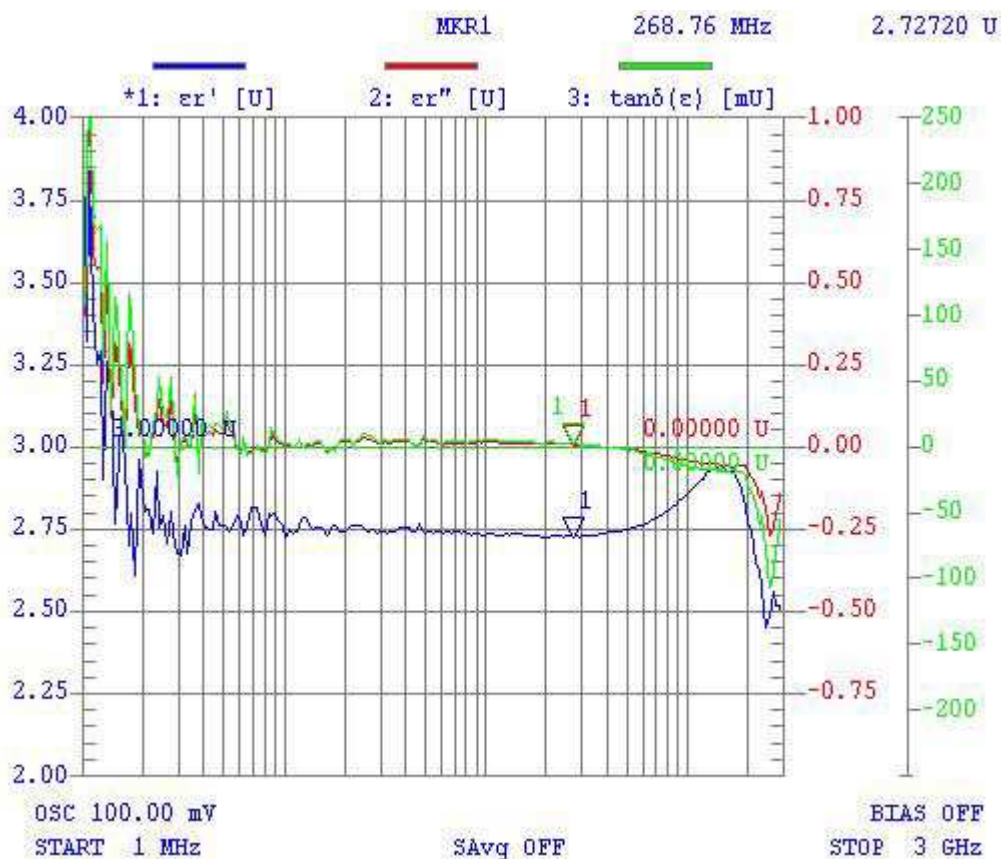
Měřicí zařízení pracuje s plátkou materiálu o průměru alespoň 15 mm a tloušťce maximálně 3 mm.

Z kaučkových bloků byly nařezány plátky o síle cca 2 mm. Poté byly vylišovány za teploty 50°C na tloušťku přesně 2 mm. Nakonec byly z plátek pomocí razidla vyraženy kruhové vzorky o průměru 16 mm.

### 13.2 Průběh měření

Nejprve byla změřena tloušťka každého vzorku. Podle očekávání kaučuk vyrelaxoval na tloušťku přibližně 2,5 mm. Tato hodnota byla zadána do řídicího počítače a vzorek byl uložen mezi zlaté elektrody a zajištěn přítlačovou pružinou. Měření probíhá samočinně postupně od frekvence 1 MHz do 3 GHz ve 201 krocích. Dle údajů výrobce jsou však hodnoty správné jen do frekvence 1 GHz, neboť při vyšších frekvencích, kdy se již délka vlny

blíží k hodnotě tloušťky vzorku, dochází k rezonanci a přístroj vykazuje zvyšování hodnoty relativní permitivity. Ta se však ve skutečnosti nezvyšuje a proto byla jako výsledná hodnota pro frekvenci 2,45 GHz použita hodnota, která dle grafického průběhu ještě není ovlivněna rezonancí, tedy případající frekvenci přibližně 0,5 GHz.



Obr.:32. Ukázka grafického výstupu

	vzorek	relativní permitivita			průměr vzorku	průměr materiálu
		1	2	3		
SMR 10 MR 11	D	2,54	2,57	2,69	2,60	2,55
SMR 10 MR 11	C	2,53	2,55	2,44	2,51	
RSS 3	F	3,10	3,00	3,13	3,08	2,95
RSS 3	C	2,83	2,94	2,72	2,83	
STR 20 BD	B	2,44	2,75	2,44	2,54	2,54
SMR 10 MR 9	D	2,79	2,65	2,47	2,64	2,60
SMR 10 MR 9	C	2,65	2,42	-	2,54	
STR 20 SED	A	3,17	3,21	2,41	2,93	2,89
STR 20 SED	A	2,84	2,85	-	2,85	

Tabulka 13: Relativní permitivita kaučuků

Naměřené hodnoty relativní permitivity u jednotlivých vzorků stejného materiálu se liší zhruba v rozsahu 10%. To je zřejmě způsobeno nehomogenitou kaučuku, v jehož struktuře lze pouhým okem, případně mikroskopem rozpoznat velké množství nečistot. Proto nebyly některé hodnoty nezahrnuty do výsledků.

## ZÁVĚR

Praktická část potvrdila, že DE ohřev kaučuku je mnohem rychlejší, než jeho konvenční ohřev. Zatímco konvenčním ohřevem trvá dosažení teploty jádra 50 °C u různých materiálů zhruba 160 až 270 minut, DE ohřevem lze stejné teploty dosáhnout již za 6 až 9 minut. Ukázalo se však také, že pokud kaučuk obsahuje nadměrnou vlhkost, mohou při rychlém ohřevu, kdy se teplo nestačí šířit vedením z místa zdroje, vznikat lokální přehřátí a výdutě. Toto lze v laboratorním měřítku eliminovat otáčením materiálu v průběhu ohřevu. V průmyslových ohřevných zařízeních se využívá vratného pohybu materiálu pro rovnoměrnější rozložení elektromagnetického pole. Ve větším měřítku lze uvažovat zařazení řízených časových prodlev do průběhu ohřevu, stanovených na základě zjištěných dielektrických konstant. Během nich by mělo dojít alespoň k vyrovnání teplot v kaučuku. Tím se však z části ztrácí výhoda rychlého ohřevu.

Nejefektivnější se jeví zajištění kaučuku bez obsahu vlhkosti. Je třeba dohlédnout na to, aby nebyl během přepravy a skladování porušen ochranný PE pytel a aby byl materiál udržován relativně v suchém prostředí. Z každé dodané dávky materiálu by měl být odebrán vzorek ke změření relativní permitivity, tepelné kapacity a obsahu vlhkosti. Podle výsledků se upraví technologické parametry řízení ohřevu.

Nezbytným předpokladem kvalitního DE ohřevu kaučuku je také rovnoměrné rozložení elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné komory.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KVASNICA, Jozef. Populární přednášky o fyzice. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 166 s.
- [2] Prof. Ing. HRADÍLEK CSc., Zdeněk. Elektrotepelná technika. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1996. 237 s.
- [3] Prof. Ing. RADA CSc., Josef. Elektrotepelná technika II. Praha : ČVUT Praha, 1983. 187 s.
- [4] STRATTON, Julius Adams. Teorie elektromagnetického pole. Ing. Vít Bláha CSc, Ing. Dr. Miroslav Promberger. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1961. 592 s.
- [5] Průmyslový mikrovlnný ohřev [online]. 2007 [cit. 2007-12-15]. Dostupný z WWW: <[www.romill.cz](http://www.romill.cz)>.
- [6] Wikipedia [online]. 2008 [cit. 2008-1-5]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>.
- [7] MIT: Elektřina a magnetismus [online]. 2008 [cit. 2008-1-9]. Dostupný z WWW: <[www.aldebaran.cz/elmg/kurz.html](http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz.html)>.
- [8] KEJNAR, Zdeněk. Ohřev kaučuků mikrovlnnou(MW) technologií. Zlín, 2007. 60 s. , 6 Vedoucí bakalářské práce Ing. Petra Loučková.
- [9] Bc. BIOLEK, Michal. Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky. Zlín, 2006. 80 s. , 6 Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Dvořák CSc.
- [10] Ing. DVOŘÁK CSc, Zdeněk. Dielektrický ohřev. Tepelné procesy ve výrobním inženýrství [online]. 2007 [cit. 2007-05-09].

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Symbol</i>	<i>Jednotky</i>	<i>Název</i>
DE		Dielektrický
MW		Mikrovlny, mikrovlnný
P	W	výkon
$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	rozdíl teploty
$\Delta x$	m	rozdíl vzdálenosti
q	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$	velikost tepelného toku
$\lambda$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
$\nabla t$	$^{\circ}\text{C}$	gradient teploty
$\dot{Q}$	W	tepelný tok
A	$\text{m}^2$	plocha
t	$^{\circ}\text{C}$	teplota
$\delta$	m	tloušťka
q	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	měrný tepelný tok
$\alpha$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	koeficient přestupu tepla
I	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	intenzita záření
$\sigma$	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
T	K	termodynamická teplota
C	$\mu\text{F}$	kapacita kondenzátoru
$\epsilon_r$	-	relativní permitivita
$\epsilon_0$	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	permitivita vakua
d	cm	vzdálenost elektrod
f	Hz	kmitočet

$\text{tg } \delta$	-	tangenta ztrátového úhlu
U	V	napětí
PVC		polyvinilchlorid
PC		polykarbonát
PMMA		polymethylmetakrylát
PA		polyamid
PE		polyetylen
$\rho$	$\text{J.m}^{-3}$	hustota elektrického náboje
Q	C	elektrický náboj
V	$\text{m}^3$	objem
dQ	J	množství elektrického náboje v elementu objemu
dV	$\text{m}^3$	element objemu
t	s	čas
J	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	proudová hustota
E	$\text{V.m}^{-1}$	intenzita elektrického pole
$F_e, f_e$	N	elektrická síla
c	$\text{m.s}^{-1}$	rychlost světla
$F_m$	N	síla na proudovodič
H	$\text{A.m}^{-1}$	intenzita magnetického pole
$\psi$	$\text{As}^{-1}$	tok indukce elektrického pole
j	$\text{A.m}^{-2}$	hustota vodivého proudu
$\Phi$	Wb	magnetický indukční tok
dl	m	element křivky
B	T	magnetická indukce
D	$\text{C.m}^{-2}$	elektrická indukce
dS	$\text{m}^2$	element plochy

$\varepsilon$	$\text{F.m}^{-1}$	permitivita
$m$	$\text{kg}$	hmotnost
$c_p$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.:1.	Rozložení MW pole uvnitř komory při použití obou zdrojů .....	12
Obr.:2.	Schéma teplotního gradientu.....	13
Obr.:3.	Polární dielektrikum bez a s působením elektrického pole .....	17
Obr.:4.	Nepolární dielektrikum bez a s působením elektrického pole .....	18
Obr.:5.	Pohled do sušící komory sušičky Romill MW L12.....	24
Obr.:6.	Mikrovlnná pásová sušička.....	27
Obr.:7.	Mikrovlnné tunelové ohřívací zařízení .....	27
Obr.:8.	Rovinná elektromagnetická vlna šířící se v kladném směru osy x .....	28
Obr.:9.	Elektromagnetické spektrum .....	29
Obr.:10.	Silokřivky elektrického pole generovaného oscilujícím nábojem.....	34
Obr.:11.	Dipólová anténa generující elektrické pole.....	34
Obr.:12.	Křivky elektrického (E) a magnetického (B) pole vytvořených dipólovou anténou.....	35
Obr.:13.	Odraz elektromagnetických vln od vodivé desky .....	35
Obr.:14.	Lékařský rtuťový teploměr .....	36
Obr.:15.	Bimetalový teploměr.....	37
Obr.:16.	Zapojení termočlánku .....	37
Obr.:17.	Infračervený teploměr Voltcraft IR-360 .....	38
Obr.:18.	Fázový diagram dielektrických ztrát.....	39
Obr.:19.	Horkovzdušné zařízení Chirana STE 39.....	44
Obr.:20.	Horkovzdušné zařízení MORA 4807.....	45
Obr.:21.	Schéma rozmístění měřících bodů na vzorku .....	46
Obr.:22.	Měření teplot vzorků.....	47
Obr.:23.	Zařízení pro MW ohřevu vzorků .....	51
Obr.:24.	Dutiny ve vzorku SMR 10/MR 9.....	52
Obr.:25.	Vzorek kaučuku zabalený do sáčku.....	55
Obr.:26.	Výduť na vzorku .....	56
Obr.:27.	Ohřev kaučuků ze záporné teploty, třetí série.....	57
Obr.:28.	Měření objemu vzorku v odměrném válci .....	59
Obr.:29.	Měření tepelné kapacity .....	60
Obr.:30.	Vzorek připravený pro měření tepelné kapacity .....	60
Obr.:31.	Měřící zařízení pro testování dielektrických materiálů .....	61

Obr.:32. Ukázka grafického výstupu..... 62

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Seznam vzorků určených pro konvenční ohřev.....	45
Tabulka 2: Kontrolní měření zdroje Professor .....	48
Tabulka 3: Kontrolní měření zdroje Romill. ....	49
Tabulka 4: Kontrolní měření zdrojů Professor + Romill.....	49
Tabulka 5: Výkon mikrovlnných zdrojů.....	50
Tabulka 6: Výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty .....	51
Tabulka 7: Souhrnné výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty - teplota .....	52
Tabulka 8: Souhrnné výsledky ohřevu kaučuků z normální teploty - směrodatná odchylka.....	53
Tabulka 9: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - první série.....	54
Tabulka 10: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - druhá série.....	55
Tabulka 11: Průběh ohřevu kaučuků ze záporné teploty - třetí série.....	56
Tabulka 12: Měření tepelné kapacity kaučuků .....	60
Tabulka 13: Relativní permitivita kaučuků .....	62

**SEZNAM PŘÍLOH**

- PŘÍLOHA P1: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 11, vzorek B
- PŘÍLOHA P2: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 11, vzorek F
- PŘÍLOHA P3: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 11, vzorek D
- PŘÍLOHA P4: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 11, souhrnná data
- PŘÍLOHA P5: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 11, graf
- PŘÍLOHA P6: Konvenční ohřev kaučuků, materiál RSS 3, vzorek E
- PŘÍLOHA P7: Konvenční ohřev kaučuků, materiál RSS 3, vzorek A
- PŘÍLOHA P8: Konvenční ohřev kaučuků, materiál RSS 3, vzorek B
- PŘÍLOHA P9: Konvenční ohřev kaučuků, materiál RSS 3, souhrnná data
- PŘÍLOHA P10: Konvenční ohřev kaučuků, materiál RSS 3, graf
- PŘÍLOHA P11: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 BD, vzorek E
- PŘÍLOHA P12: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 BD, vzorek D
- PŘÍLOHA P13: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 BD, vzorek F
- PŘÍLOHA P14: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 BD, souhrnná data
- PŘÍLOHA P15: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 BD, graf
- PŘÍLOHA P16: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 9, vzorek A
- PŘÍLOHA P17: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 9, vzorek E
- PŘÍLOHA P18: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 9, vzorek F
- PŘÍLOHA P19: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 9, souhrnná data
- PŘÍLOHA P20: Konvenční ohřev kaučuků, materiál SMR 10/MR 9, graf
- PŘÍLOHA P21: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 SED, vzorek A
- PŘÍLOHA P22: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 SED, vzorek C
- PŘÍLOHA P23: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 SED, vzorek E
- PŘÍLOHA P24: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 SED, souhrnná data
- PŘÍLOHA P25: Konvenční ohřev kaučuků, materiál STR 20 SED, graf