

Ohřev kaučuků mikrovlnnou(MW) technologií

Zdeněk Kejnar

Bakalářská práce

2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je ověřit výkonnost dielektrického ohřevu kaučuků oproti konvenčním způsobům ohřevů.

V první části je vypracována literární studie zahrnující charakteristiky kaučuků, procesů přenosů tepla a dielektrického ohřevu. V další části jsou zařazeny experimentální zkoušky a vyhodnocení ohřevů kaučuků MW technologií, vedením, sáláním a prouděním. V konečné fázi je nastíněn vliv investice do pořízení mikrovlnného zařízení z ekonomického hlediska.

Klíčová slova: ohřev, kaučuk, mikrovlnný, technologie

ABSTRACT

The aim of the thesis is verification of microwave rate of rubber heating against to conventional heating ways.

In the first part is included study of rubber characteristics, processes of heat transfer and dielectric heat. Next part is focused on experimental trials and evaluation of rubber heating by means of MW technology, convention, radiation and conduction. In the final part is illustrated impact to microwave purchase investment from economic view.

Keywords: heating, rubber, microwave, technology

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí své diplomové práce, slečně Ing. Petře Loučkové za plnou podporu, odborné vedení, poskytnutí potřebných informací, za mnohé cenné rady a podněty, které mi poskytovala v průběhu vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji společnosti Barum Continental, spol. s r.o. za poskytnuté suroviny a informace.

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

Ve Zlíně, 31. 05. 2007

.....

podpis

OBSAH

OBSAH	4
ÚVOD.....	6
I. TEORETICKÁ ČÁST	7
1 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU	8
2 ROZDĚLENÍ KAUKČUKŮ	9
2.1 PŘÍRODNÍ KAUKČUK(PK).....	9
2.2 BUTADIENSTYRENOVÝ KAUKČUK (SBR).....	10
2.3 BUTYLKAUKČUK(IIR).....	11
2.4 POLYISOPREN(IR).....	11
2.5 BUTADIEN-AKRYLONITRILOVÝ KAUKČUK(NBR).....	11
3 PROCESY PŘENOSU TEPLA PŘI ZPRACOVÁNÍ POLYMERŮ	13
3.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM	13
3.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM	14
3.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM.....	15
4 TEORIE DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ.....	18
4.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY.....	18
4.2 APLIKACE DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU	22
4.3 DIELEKTRICKÝ OHŘEV KAUKČUKŮ	22
4.4 PODSTATA A VÝHODY PRŮMYSLOVÉHO DE OHŘEVU.....	23
5 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ.....	26
II. PRAKTICKÁ ČÁST	28
6 STANOVENÍ PLÁNU PRAKTICKÉ ČÁSTI	29
7 POUŽITÉ MATERIÁLY	30
7.1 PŘÍRODNÍ KAUKČUKY (PK)	30
7.2 SYNTETICKÉ KAUKČUKY	30
7.2.1 Butadienstyrenové kaučuky(Kralex, Buna).....	30
7.2.2 Butylkaučuky(IIR).....	31
8 STROJE A ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY	32
8.1 DIGITÁLNÍ MIKROVLNNÉ ZAŘÍZENÍ PROFESSOR MTE – 235 BX - ROMILL.....	32
8.2 LABORATORNÍ VULKANIZAČNÍ LIS.....	33
8.3 VAKUOVÝ TVÁŘECÍ STROJ FORMECH 300X	34
8.4 HORKOVZDUŠNÁ KOMORA STE 39(SUŠÁRNA)	35
9 PROGRAM PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	36

9.1	DIELEKTRICKÝ OHŘEV KAUČUKŮ ZA NORMÁLNÍ TEPLoty	36
9.2	OHŘEV KAUČUKŮ VEDENÍM	38
9.3	OHŘEV KAUČUKŮ PROUDĚNÍM	39
9.4	OHŘEV KAUČUKŮ SÁLÁNÍM	40
9.5	STANOVENÍ TEPLOTNÍ A TEPELNÉ VODIVOSTI (Λ , λ)	42
10	SHRnutí VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	45
10.1	DIELEKTRICKÝ OHŘEV	45
10.2	OHŘEV PROUDĚNÍM	45
10.3	OHŘEV SÁLÁNÍM	45
10.4	OHŘEV VEDENÍM	45
11	ZHODNOCENÍ INVESTICE MW TECHNOLOGIE Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA	47
11.1	Vliv MW OHŘEVU NA NÁKLADY A TRŽBY:	47
11.2	VÝPOČET NÁVRATNOSTI INVESTICE	47
11.3	MIKROVLNNÉ ZAŘÍZENÍ	48
11.3.1	Výpočet efektivnosti a návratnosti investice:	48
11.4	KOMORA PRO PŘEDEHŘEV KAUČUKU HORKÝM VZDUchem	49
11.4.1	Výpočet efektivnosti a návratnosti investice:	49
11.5	SROVNÁNÍ KAPACITY JEDNOTLIVÝCH ZAŘÍZENÍ	50
12	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
	SEZNAM TABULEK	59
	SEZNAM PŘÍLOH	60

ÚVOD

V současně době platí trend co nejvyšších úspor ve výrobě. Stejný trend platí i v plastikářské a gumárenské výrobě, které patří mezi výroby s vysokou energetickou náročností. Ta se jakožto náklad na energii podílí významnou částí do ceny výrobku.

Energeticky nejnáročnější operací v gumárenské výrobě je příprava materiálu. Ta tvoří z více jak poloviny celkové energetické náklady, proto je důležité hledat cesty, které by vedly ke snížení energetických nákladů, tím i ceny finálního výrobku a zvýšení schopnosti výrobků konkurovat na tuzemském i zahraničním trhu. Jednou z diskutovaných cest vedoucích ke snížení energetických nákladů je využití mikrovlnného ohřevu v procesu přípravy gumárenských směsí.

Aplikace mikrovlnného zpracování polymerů a kompozitů již byla prováděna v několika laboratořích po celém světě a to již dvě desetiletí. Podstavný vliv vytvořila v oblasti gumárenského a potravinářského průmyslu, kde zpracování prostřednictvím mikrovlnného ohřívání zaznamenal značné výhody. Narozdíl od obvyklých tepelných postupů tyto výhody spočívají v rychlém objemovém ohřevu, ne v ohřevu na povrchu, energetických úsporách, nízkých provozních nákladech, zvýšeným výkonem a redukcí degradace.

Předmětem úsilí bakalářské práce je vyšetřit rychlost mikrovlnného ohřevu kaučuků oproti konvenčním ohřevům a ekonomické výhody tohoto ohřevu.

Práce je rozdělena do několika částí. V první části je vypracována literární studie, na kterou dále navazuje experimentální část. V této části jsou zařazeny tyto zkoušky: ohřev kaučuku MW technologií, ohřev vedením, sáláním a prouděním. Je zde také diskutován vliv investice na pořízení mikrovlnného zařízení z ekonomického hlediska.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU

Kaučuk jako surovina je charakterizován neobvyklou kombinací fyzikálních vlastností:

vysoká elasticita při nepatrné tvrdosti a mimořádně velkou tažností. Pod pojmem kaučukovitý stav bývá chápána schopnost hmoty vracet se po uvolnění síly působící deformaci tahem, tlakem nebo torzní rychle do původního geometrického tvaru. Látky, které vykazují kaučukovité vlastnosti při normální teplotě, se označují jako elastomery.

Podle jiné definice jsou kaučuky makromolekulární látky schopné přecházet vulkanizací ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického [1].

Při skladbě směsí je cílem vypracovat směsi, které lze zpracovávat na dosavadních zařízeních a které vulkanizací dávají pryž požadovaných vlastností; přitom je nutné mít na zřeteli i ekonomii výroby [2].

Gumárenské výrobky jsou vulkanizované směsi kaučuků, různých chemikálií a přísad. Základní složkou směsi je kaučuk, který dává směsi i pryži základní charakteristické vlastnosti. Dále se snažíme modifikovat vlastnosti kaučuku tak, aby výsledný produkt co nejlépe vyhovoval jak aplikaci, tak i požadavkům na zpracování [3].

V gumárenských směsích se koncentrace přísad označuje *dsk* (díly na sto dílů kaučuku) nebo *phr* (z anglického parts per hundred rubber) [3].

Gumárenské směsi členíme:

1. elastomer,
2. vulkanizační činidla,
3. urychlovače,
4. aktivátory,
5. prostředky proti stárnutí (antidegradanty, antiozonanty, antioxidanty)
6. plniva (ztužující, neztužující),
7. změkčovadla,
8. regenerační přísady,

další přísady (retardéry, plastikační činidla)..

2 ROZDĚLENÍ KAUKČUKŮ

Vyráběné kaučuky se v literatuře běžně rozdělují podle jednoduchého kritéria na kaučuky a pro všeobecné použití a na kaučuky pro speciální použití. *Kaučukem pro všeobecné účely* se rozumí takový polymer, který svou nízkou cenou a zpracovatelskými a mechanickými vlastnostmi splňuje požadavky hlavních aplikačních oblastí. Klasickými příklady použití kaučuků jsou dynamicky silně namáhané součásti (pneumatiky, transportní pásy, profily a těsnění, hadice, manžety, kabelové pláště, tlumící elementy, podrážky, aj.). Tyto vyžadují vysokou flexibilitu i při nízkých teplotách a nízkou termoplastičnost při zvýšených teplotách. Ve výrobě pneumatik se používá nejvíce kaučuků a to 35-45%. Do této skupiny dnes patří zejména uhlovodíkové kaučuky typu: PK, SBR, IR, NBR. *Kaučuky pro speciální použití* mají jednu nebo i několik vlastností, kterými předčí univerzální kaučuky. Nejvýznamnější podskupinou jsou teplovzdorné kaučuky.

2.1 Přírodní kaučuk(PK)

Je obsažen v latexu kaučukodárných stromů a keřů. Nejvýnosnější pro výrobu PK je druh *Hevea Brasiliensis* na plantážích okolí rovníku. Největšími producenty přírodního kaučuku jsou státy jihovýchodní Asie a to Malajsie, Indonésie, Kambodža, Vietnam, dále Brazílie, Rovníková Afrika. Výroba kaučuku začíná čepování latexu, který vytéká ze stromů do připravené misky. Po několika hodinách výtok ustane a obsah nádobek se slévá do sběrných nádob. Latex obsahuje asi 40 % kaučuku, který se z něj získá vysrážením pomocí kyseliny mravenčí nebo octové. Získané bloky PK se propírají vodou, suší, konzervují uzením. Jednotlivé druhy se liší obsahem nečistot, barvou a použitím. Mezi nejznámější druhy patří: uzený kaučuk, světlá krepa [2].

Přírodní kaučuk lze použít ve všech případech, kde se nepožaduje odolnost pryže proti botnání (v nepolárním prostředí), zvýšená odolnost proti teplotě, některým chemickým činidlům, povětrnosti a ozónu. Jeho předností je velká pevnost neplněných a světlých pryží, výborné dynamické vlastnosti (malé hysterezní ztráty), dobrá odolnost proti nízkým teplotám. Není běžně vhodný pro rychlé vulkanizace při vyšších teplotách [12].

Nejpoužívanější přírodní kaučuky v gumárenském průmyslu přicházejí v balících o hmotnosti 35 kg od producentů Malajsie – SMR, Indonésie – SIR a Thajska - STR. Méně

používány kaučuk při výrobě pneumatik je uzený kaučuk – RSS. Jednotlivé druhy se liší obsahem nečistot, barvou a použitím [4].

2.2 Butadienstyrenový kaučuk (SBR)

Butadienstyrenové kaučuky jsou nejdůležitějším druhem syntetického kaučuku a toto postavení si pravděpodobně udrží nadále.

Průmyslová výroba SBR byla umožněna zvládnutím emulzní polymerace už před druhou světovou válkou. Prvním syntetickým kaučukem tohoto typu byla německá Buna S. Polymerace se prováděla při teplotě 50 °C. Vzniklé polymery měly velkou molekulovou hmotnost, a proto byly tuhé a nedaly se přímo zpracovávat. Intenzivní výzkum v poválečném období přinesl tzv. redukčně-oxidační polymeraci. Polymerační teplotu bylo možno snížit z původních 50°C na 5 °C při zachování dostatečné rychlosti polymerace. Při nižší teplotě vznikal polymer s pravidelnější strukturou a lepšími vlastnostmi. Tento druh emulzního SBR se nazývá studený (SBR 1500). V České republice se vyrábí pod označením Kralex [1].

Všeobecně se SBR hůře zpracovává než přírodní kaučuk, proto se do směsi přidává více změkčovadel. SBR je používán pro pryže dynamicky namáhané a pryže s vysokou strukturální pevností. SBR se často zpracovává ve směsi s kaučukem přírodním, cis-1,4-polyizoprenem nebo cis-1,4-polybutadienem. Přídavkem přírodního kaučuk se zlepšuje konfekční lepivost, vytlačovatelnost, válcování. SBR je vhodný pro výrobu běžných výrobků: podrážek, podpatků, hadic apod. Zvláště je třeba zvážit použití SBR v pláštích pneumatik. Z hlediska výkonu lze téměř 100 % použít do směsí na pláště pneumatik osobních automobilů; malá konfekční lepivost nánosů zhoršuje však výkon při konfekci. Výhodou je, že lze používat kratších vulkanizací při vyšších teplotách. Při volbě SBR se přechází na kaučuky polymerované za studena, regulované (typ 1500), které mají lepší mechanické vlastnosti, především odolnost proti opotřebení. Kaučuk teplý (typ 1000) se snáze plastikuje, poněkud lépe zpracovává, snáší větší obsah plniv a dává se mu přednost pro pryže, které mají dobře odolávat prolamování.

2.3 Butylkaučuk(IIR)

Kopolymer isobutylenu s isoprenem IIR se obecně označuje jako butylkaučuk a vyrábí se průmyslově od roku 1942. Patří mezi dobře známé a zavedené speciální kaučuky a uplatňuje se v řadě aplikací, při nichž se využívá jeho malé propustnosti pro plyny a odolnosti proti kyslíku, ozónu a chemickému působení. Mezi další dobré vlastnosti IIR patří také tepelná stabilita, vysoký koeficient tření a tlumení vibrací. Je nejlevnějším speciálním kaučukem. Vyrábí se při nízkých teplotách roztokovou kationtovou kopolymerací isobutylenu s malým množstvím isoprenu (asi do 3%).[1].

Hlavní použití IIR bylo při výrobě duší, které se ovšem s rozšiřováním bezdušových pneumatik vyrábějí v malém objemu. Další aplikace: parní hadice, dopravní pásy, adheziva a tmely, vyložení nádob, podložky pod koleje a mosty, elektroizolace.

2.4 Polyisopren(IR)

Snaha vyrobit syntetický polymer, který by se svými vlastnostmi nejvíce podobal přírodnímu kaučuku, byla korunována v roce 1955. Použitím stereospecifických katalyzátorů se podařilo připravit syntetický polyisopren s velkým obsahem struktury cis – 1,4, který se ze všech průmyslově vyráběných kaučuků nejvíce blíží přírodnímu kaučuku, pokud jde o lepidlost směsí, velkou pevnost neplněné pryže, velkou odrazovou pružnost a dobrou strukturní pevnost za tepla. Průmyslově vyráběné polyisopreny nejsou zcela identické s přírodním kaučukem, ale úpravami receptury a zpracování lze dosáhnout toho, že isoprenový kaučuk je schopen nahradit přírodní kaučuk. Polyisoprenové pryže mají obecně nižší moduly a větší tažnost než PK. Syntetické polyisopreny se vyznačují menší absorpcí vody a také výbornými elektrickými vlastnostmi.

Největší využití nachází IR v běhounových a kostrových směsích pro výrobu pneumatik nákladních automobilů, letadel a traktorů. Další aplikace jsou: technická pryž, obuv, výrobky používané v lékařství a ve styku s potravou.[1].

2.5 Butadien-akrylonitrilový kaučuk(NBR)

Tento druh kaučuku byl vyvinut pro speciální pryže, které mají odolávat botnání v kapalinách převážně nepolární povahy. Vyrábí se emulzní polymerací s obsahem různého množství akrylonitrilu v rozsahu 18 – 50%. NBR je méně plastický než kaučuk přírodní a

při míchání směsí se více zahřívá. Nitrilkaučuk se běžně dodává jako pás navinutý na trubce anebo blok. Obecný názvem Nitrilkaučuky se rozdělují podle obsahu vázaného akrylonitrilu. Se stoupajícím obsahem akrylonitrilu se zvětšuje odolnost proti botnání, nepropustnost pro plyny, odolnost proti zvýšené teplotě a zlepšují se mechanické vlastnosti. Mezi zhoršující se vlastnosti NBR, související s vyšším obsahem akrylonitrilu patří odolnost vůči nízkým teplotám. Kopolymery se středním obsahem akrylonitrilu odolávají minerálním olejům. [1].

Vliv obsahu akrylonitrilu na jednotlivé vlastnosti lze schematicky shrnout takto:

	Obsah akrylonitrilu
	18% ← → 50%
Odolnost proti olejům vzrůstá	→
Pevnost vzrůstá	→
Tvrdost vzrůstá	→
Odolnost proti oděru vzrůstá	→
Nepropustnost pro plyny vzrůstá	→
Tepluvzdornost vzrůstá	→
Mrazuvzdornost se zlepšuje	←
Odrasová pružnost vzrůstá	←
Snášlivost se změkčovadly vzrůstá	←

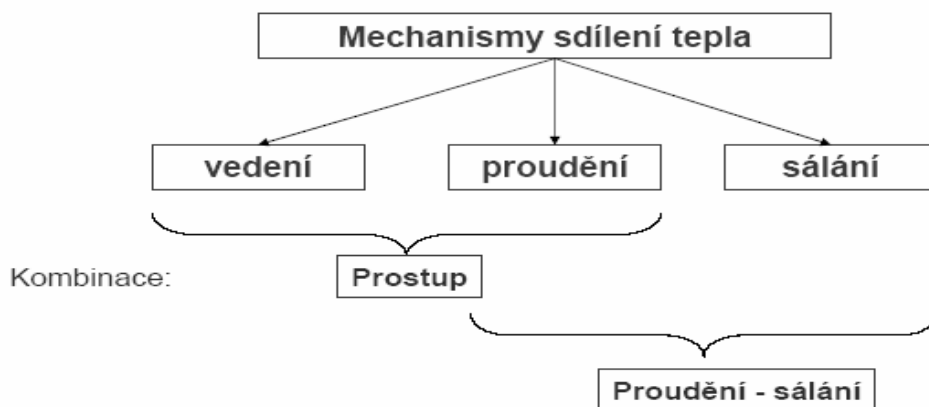
Výrobky z nitrilkačuku našly upotřebení v řadě průmyslových odvětví, v průmyslu automobilovém, leteckém, palivářském, textilním a polygrafickém – všude tam, kde pryž přichází do styku s olejem, benzínem nebo jinými nepolárními rozpouštědly (těsnění, ucpávky, hadice, nádrže pohonných hmot, rukavice; válce do tiskových strojů; hnací řemeny, dopravní pásy, tlumící elementy, teplotvzdorná i tvrdá pryž).

3 PROCESY PŘENOSU TEPLA PŘI ZPRACOVÁNÍ POLYMERŮ

Kaučuky se mohou zpracovávat různými postupy. Technicky nejvýznamnější je vulkanizace za tepla ve formách. V praxi jsou zavedeny tyto hlavní způsoby provozní vulkanizace: vulkanizace v přímé páře, v horkém vzduchu(technická pryž), v horké vodě. [11]

Mezi procesy přenosu tepla patří sdílení tepla. Přenos tepla je nerovnovážný termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase. [15].

Při zpracování polymerů se uplatňují všechny způsoby tj.: sdílení tepla vedením(kondukcí), prouděním(konvekcí) a sáláním(radiací)



Obr. 1. Schéma mechanismu sdílení tepla

3.1 Sdílení tepla vedením

Vedení(kondukce) - molekulární mechanismus sdílení tepla, který nastává předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Fourierův zákon vedení tepla(ustálený stav)[15].:

$$d\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (1)$$

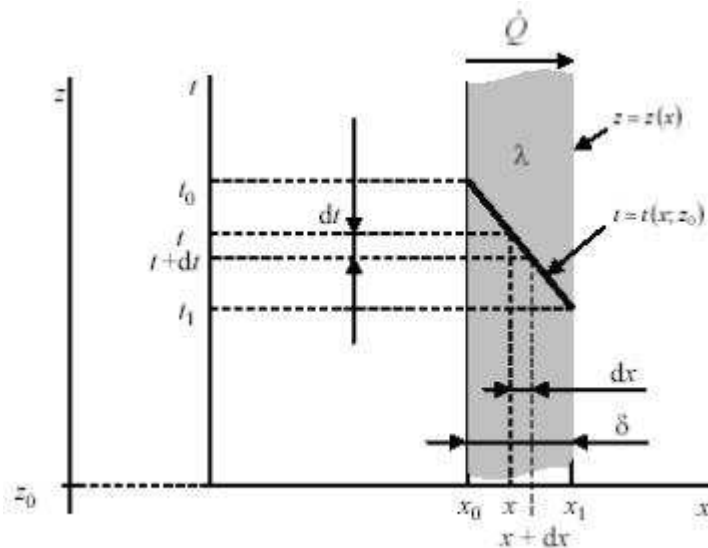
kde:

A je teplosměnná plocha [m²]

λ koeficient tepelné vodivosti [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]=[$\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}$]

po integraci(deska):

$$\dot{Q} = \lambda \frac{t_0 - t_1}{\delta} A \quad (2)$$



Obr. 2. rozdělení teploty t napříč deskou (teplotní profil)

3.2 Sdílení tepla prouděním

Proudění (konvekce) je sdílení tepla mezi povrchem a prostředím (z místa o vyšší teplotě na místo s nižší teplotou). Newtonův ochlazovací zákon [15].:

$$d\dot{Q} = \alpha_Y \langle t_A \rangle - t_{WA} \big| dA \quad (\text{ustálený stav}) \quad \dot{Q} = \alpha_Y \langle t_A \rangle - t_{WA} \big| A \quad (3)$$

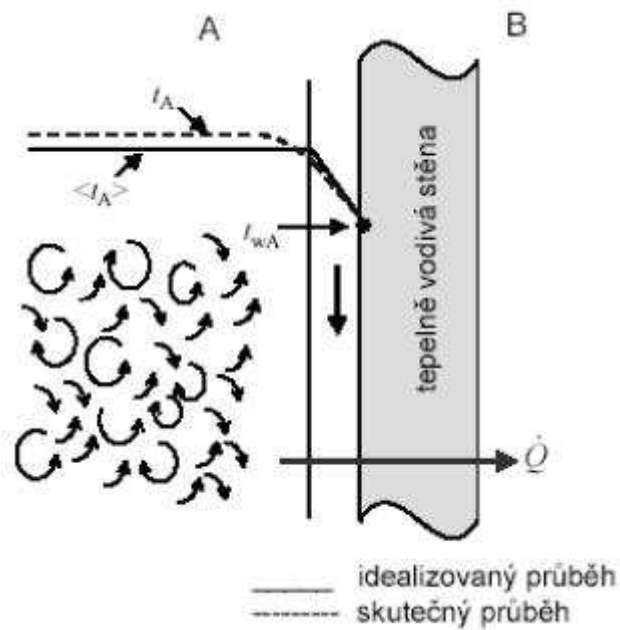
kde

A je teplosměnná plocha [m^2]

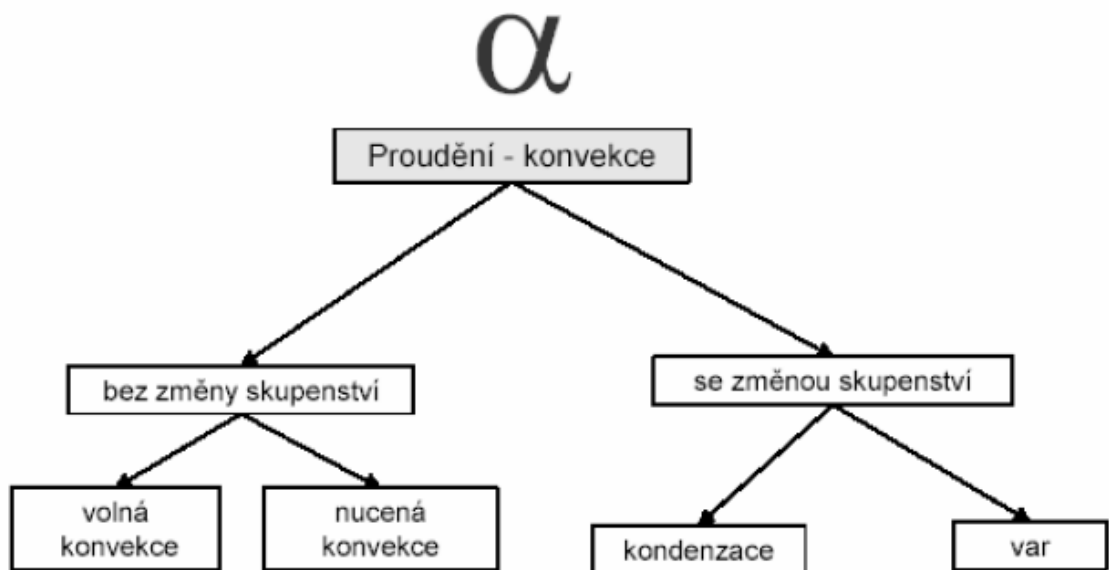
$\langle t_A \rangle$ střední teplota tekutiny [$^{\circ}\text{C}$]

t_{WA} teplota povrchu stěny u tekutiny A

α_A součinitel přestupu tepla [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$]=[$\text{kg s}^{-3} \text{K}^{-1}$]



Obr. 3. průběh přestupu tepla u proudění



Obr. 4. schéma realizace sdílení tepla

3.3 Sdílení tepla sáláním

Při sdílení tepla sáláním je energie předávána tepelným zářením, které je určeno teplotou zářícího tělesa. Pojmeme tepelné záření rozumíme elektromagnetické vlnění, které se ve vakuu šíří rychlostí světla a jehož vlnové délky jsou v intervalu 0,3 až 40 μm . To znamená, že toto záření zasahuje okrajovou část ultrafialového záření, celou oblast viditelného světla

a část infračerveného záření. Tepelné záření má kromě vlnového také korpuskulární charakter, jeho energie je přenášena fotony.

Každé těleso vysílá záření v rozsahu vlnových délek od 0 do ∞ , ale pro každou teplotu leží hlavní část energie tepleného záření v určitém úseku spektra.

Intenzita vyzařování (zářivost nebo sálavost) je množství energie vyzářené z povrchu tělesa jednotkové plochy S za jednotku času.

$$E = \frac{d\dot{Q}}{dS} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4)$$

Dopadne-li na těleso určitý zářivý tok \dot{Q} , tak část \dot{Q}_R se odrazí, část \dot{Q}_A se pohltí a část \dot{Q}_D tělesem projde. Odtud Kirchhoffův zákon [15].:

$$\frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}} + \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}} + \frac{\dot{Q}_D}{\dot{Q}} = 1 \Rightarrow R + A + D = 1 \quad (5)$$

kde

R je odrazivost

A pohltivost

D propustnost

Kapaliny a tuhé látky:

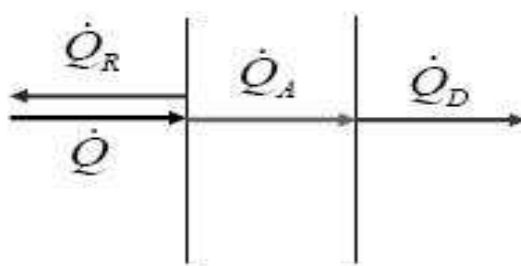
$$R + A = 1$$

Plyny (mají prakticky nulovou odrazivost):

$$A + D = 1$$

Vzduch a jiné plyny (mají téměř nulovou pohltivost):

$$A = 0, D = 1$$



Obr. 5. dopad zářivého toku na těleso

V mezních případech $D=1$ – dokonale průteplivé těleso, $A=1$ dokonale černé těleso a $R=1$ dokonale bílé těleso. Dokonale černé těleso je ideální zářič vysílající maximální energii všech vlnových délek a ve všech směrech do poloprostoru a absorbující rovněž všechno na něj dopadající záření. Výpočet výměny tepla sáláním mezi dvěma černými povrchy:

$$\dot{Q}_o = \varphi_{1-2} S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

kde

σ je boltzmannova konstanta = $5,669 \cdot 10^{-9} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

Pro reálné povrchy platí:

$$\dot{Q} = \varepsilon_{1-2} \cdot \dot{Q}_o \quad (7)$$

$$\dot{Q} = \varphi_{1-2} S_1 \varepsilon_{1-2} C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

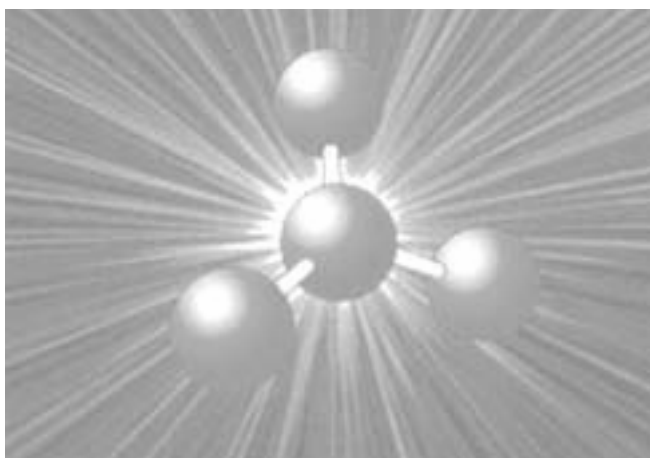
kde úhrnná emisivita

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} - 1}$$

4 TEORIE DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ

Dielektrický (DE) ohřev, jenž zahrnuje jednak mikrovlnný (MW) ohřev, jednak ohřev na radiových frekvencích (RF), je založen na transformaci energie střídavého elektromagnetického pole na tepelnou energii v materiálech s nerovnoměrným rozložením elektrických nábojů v molekulách tzv. polárních materiálů - dielektrik.

Ve střídavém elektromagnetickém poli o velmi vysokém kmitočtu se dipóly polárních molekul natácejí tak, aby jejich póly sledovaly okamžitý směr pole (mění se až několik miliardkrát za vteřinu). Uplatňují se přitom dva jevy: mezimolekulární tření při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil a hystereze mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odezvou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul. Tak se produkt zdánlivě ohřívá sám. Výsledkem je velmi rychlý ohřev materiálu, často během několika sekund nebo minut. Je běžné, že mikrovlny působí i řádově rychleji než konvenční ohřev [6].



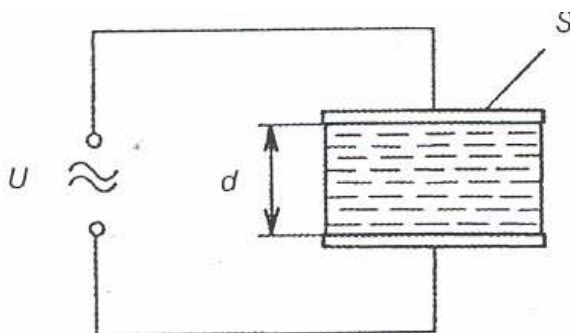
Obr. 6. Molekuly při MW ohřevu

4.1 Základní vztahy

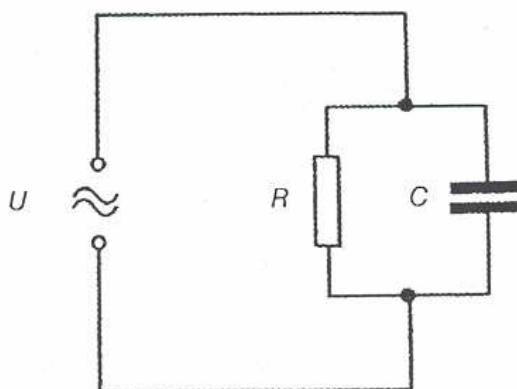
Elektricky nevodivé látky lze ohřívát ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli tepelnou energií, která vzniká na základě dielektrických ztrát těchto látek. Elektricky nevodivé látky obsahují polarizované molekuly a disociované kladné a záporné ionty. Molekuly a ionty se chovají jako elektrické dipóly a snaží se sledovat rychlé změny

polarizace elektrického pole. V důsledku vzájemného tření částic vzniká tzv. dielektrické teplo [10].

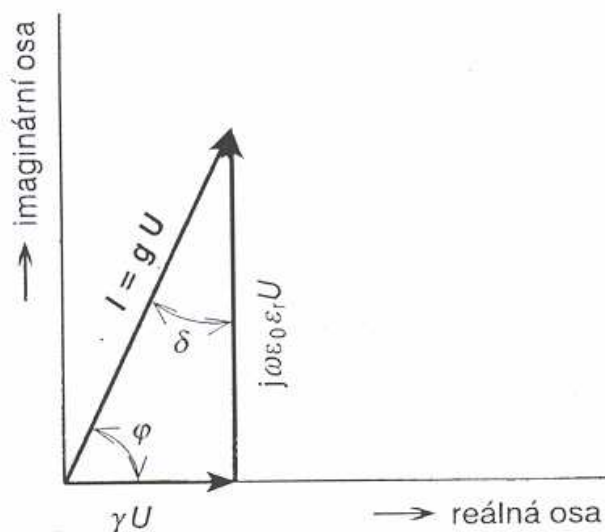
Na Obr.7. je naznačena deskový kondenzátor, jehož dielektrikum je tvořeno elektricky nevodivou látkou, která je charakterizována relativní permitivitou ϵ_r (-) a ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta$ (-). Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ lze odvodit z náhradního schématu Obr.8. a z fázového diagramu na Obr.9.



Obr. 7. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem



Obr. 8. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem



Obr. 9. Fázový diagram dielektrických ztrát

Kapacita kondenzátoru C je dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot d^{-1} \quad [F, F.m^{-1}, m^2, m] \quad (9)$$

kde

ε_0 je permitivita vakua [$8,859 \cdot 10^{-12} F.m^{-1}$],

ε_r relativní permitivita materiálu (relativní permitivita je poměr kapacity C kondenzátoru vyplněného dielektrikem a kapacity C_0 stejného kondenzátoru s vakuem),

S plocha desky kondenzátoru [m^2],

d vzdálenost desek [m].

Kapacita kondenzátoru tvaru jednotkové krychle bude:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (10)$$

Z náhradního schématu plyne výsledná vodivost:

$$G = R^{-1} + j \cdot \omega \cdot C \quad (11)$$

Výsledná vodivost jednotkové krychle je:

$$g = (\rho^{-1} + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r) = (\gamma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r) \quad (12)$$

kde

ρ [$\Omega \cdot m$] je rezistivita (měrný odpor),

γ [$S \cdot m^{-1}$] konduktivita (měrná vodivost).

Mezi proudem obvodu I a napětím U platí vztah:

$$I = gU = (\gamma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r)U \quad (13)$$

Z fázového diagramu lze odvodit ztrátový činitel:

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r} \quad [-, Sm^{-1}, s^{-1}, Fm^{-1}, -] \quad (14)$$

Hodnoty ϵ_r a $tg \delta$ nejdou konstantní, ale mění se s frekvencí a závisí na teplotě, vlhkosti apod. Příkon, který se mění v teplo, je dán vztahem:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [W, V, A, -] \quad (15)$$

Pro malé úhly δ platí: $\cos \varphi = \sin \varphi = tg \varphi$ (-)

Efektivní hodnota svorkového napětí U kondenzátoru při průchodu sinusového proudu o efektivní hodnotě I je:

$$U = \frac{I}{\omega \cdot C} \quad [V, A, s^{-1}, F] \quad (16)$$

Efektivní hodnota proudu I, který prochází kondenzátorem o kapacitě C po připojení na svorkové sinusové napětí U je:

$$I = \omega \cdot C \cdot U \quad [A, s^{-1}, F, V] \quad (17)$$

Příkon kondenzátoru lze pak vyjádřit vztahem:

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot tg \delta \quad [W, s^{-1}, F, V, -] \quad (18)$$

Dosazením do tohoto výrazu se získá praktický vztah:

$$P = 2\pi f \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot d^{-1} \cdot U^2 \cdot tg \delta \quad [W, Hz, F \cdot m^{-1}, -, m^2, m, V, -] \quad (19)$$

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že čím je větší frekvence f [Hz], tím menší je potřebná intenzita elektrického pole E [V/m], tj. napěťový gradient Ud^{-1} .

4.2 Aplikace dielektrického ohřevu

Dielektrický ohřev se často používá v dřevozpracujícím průmyslu. Při výrobě překližek z vrstev natřených umělou pryskyřicí se obvykle využívá frekvence asi 1MHz. Sušičky dřevěných dílů mají hliníkové dopravní pásy, na kterých se materiál posunuje pod stojící elektrodou, která je připojena na zdroj vysokofrekvenčního napětí s frekvencí okolo 10 MHz.

Ve sklářském průmyslu se dielektricky slepují vrstvená skla. Suší se i jemná keramika a různé formy. Aplikací dielektrického ohřevu se zkrátí polymerizace plastů z několika hodin na několik minut. Podobně se doba sušení látek z umělého hedvábí zkrátí z deseti dnů na několik desítek minut.

V potravinářském průmyslu se dielektricky suší a konzervuje mouka i jiné potraviny.

V posledních několika letech se i u nás velmi rozšířily mikrovlnné trouby, které podstatně zrychlují přípravu pokrmů. Používají se k rozmrazování potravin, pro přípravu zeleniny, ryb, drůbeže, hotových jídel i dietní stravy [10].

Samostatnou kapitolou je využití dielektrického ohřevu v lékařství. Diatermie umožňuje cílené prohřívání tkání a přináší pacientům často významnou úlevu

4.3 Dielektrický ohřev kaučuků

Přírodní guma (NR) a butadienstyrenová guma (SBR) se vyznačují velmi nízkými ztrátami a tím slabou reakcí na DE ohřev.

Ke zlepšení mechanických vlastností a dosažení požadovaných fyzikálně-chemických parametrů se proto používají některé jemné substance - vhodná plnidla, např. uhlík. Slouží i ke zvýšení polárního efektu a usnadňují DE ohřev.

Mezi nízkoztrátové elastomery patří etylen-propylenový kaučuk (EPDM).

Naproti tomu některé přírodní elastomery mají vysoké dielektrické ztráty, jako je chlorobutadienový kaučuk (CR) a nitrilo-butadienový kaučuk (NBR). Není-li struktura makromolekuly zcela symetrická, vyznačuje se tato permanentním dipólmomentem.

Při uvedení molekul do pohybu, např. působením tepla nebo elektromagnetického pole, se uplatňují dvě různé tzv. relaxační frekvence, s rozdílnými mechanismy:

- relaxace α na nízkých kmitočtech, způsobovaná mikrobrownovým pohybem uvnitř řetězce,
- relaxace β na vyšších frekvencích, způsobovaná změnami orientace dipólů a torzním pohybem řetězců.

Při zvýšení teploty se zvyšuje relaxační frekvence α . Dielektrické ztráty rostou, vzniká nebezpečí lavinového tepelného efektu. Současně se zvyšuje relaxační frekvence α , a přibližuje se frekvenci β . Proces proto vyžaduje přesné řízení, jež zařízení na principu DE ohřevu umožňují v potřebné míře zabezpečit [11].

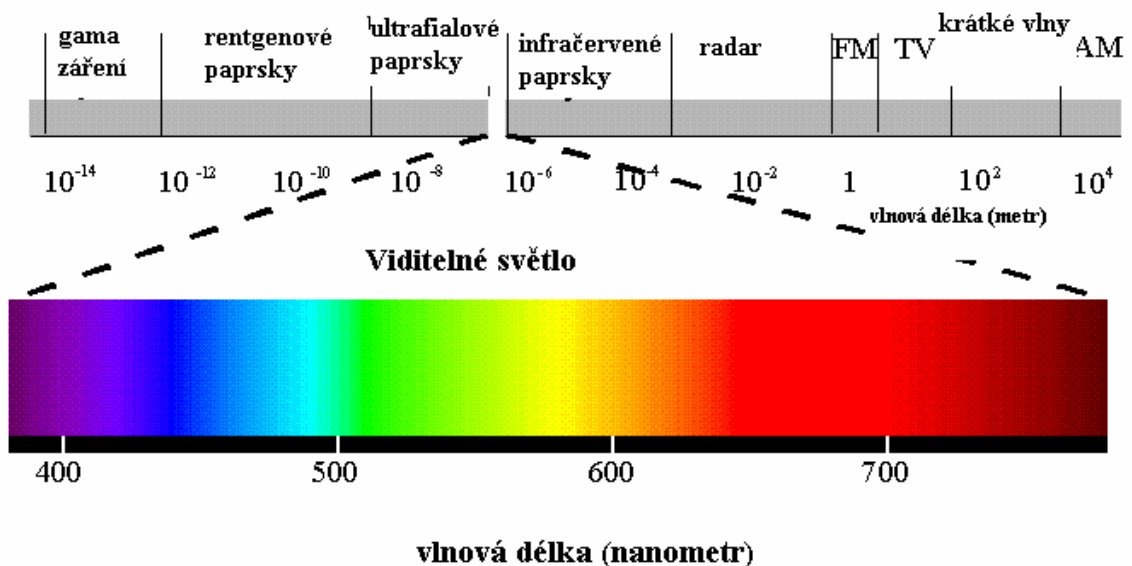
Tab. 1. Relativní permitivity a činitele ztrát některých materiálů [10]

Materiál	ϵ_r (-)	$\text{tg } \delta$ (-)
vzduch	1,0	0
voda	80,0	1,0
sklo	4,5-8,0	0,002-0,015
polyamid	3,0-4,0	0,015-0,004
kaučuk syntetický	2,7-2,9	0,005-0,1
kaučuk přírodní	2,1-2,3	0,004-0,005

4.4 Podstata a výhody průmyslového DE ohřevu

Mikrovlnný ohřev (MW) představuje progresivní technologii se stále širším spektrem průmyslových a potravinářských aplikací. Výrobou zařízení pro průmyslové účely se zabývají desítky firem v USA, Japonsku, Velké Británii, Německu, Francii, Itálii, Švédsku a v dalších zemích. Ve světovém průmyslu prakticky již neexistuje zpracovatelský obor,

kde by se mikrovlny neprosadily. Uplatňují se buďto jako efektivnější technologie nahrazující konvenční ohřevná zařízení nebo, a to častěji, se pořízují proto, že umožňují zcela novou kvalitu zpracování. Přestože ve vyspělých zemích se technologie MW používá v širokém spektru aplikací, úroveň informovanosti o jejich možnostech a výhodách je u potenciaálních zákazníků ve střední Evropě prozatím nízká. Přesto informace o aplikacích MW technologie se zájmem posuzuje již značný počet představitelů významných zpracovatelských podniků. Kromě zvýšení kvality a tím i prodejnosti konkurenceschopných výrobků, nedosažitelných jinými technologiemi, umožňuje MW ohřev zkrácení výrobní doby a snížení výrobních nákladů [6].



Obr. 10. Oblasti spektra elektromagnetického záření [9]

Podstatou MW ohřevu, podobně jako v komerčních MW troubách v domácnostech, je přeměna energie střídavého elektromagnetického pole na tepelnou energii působením na polární molekuly materiálu.

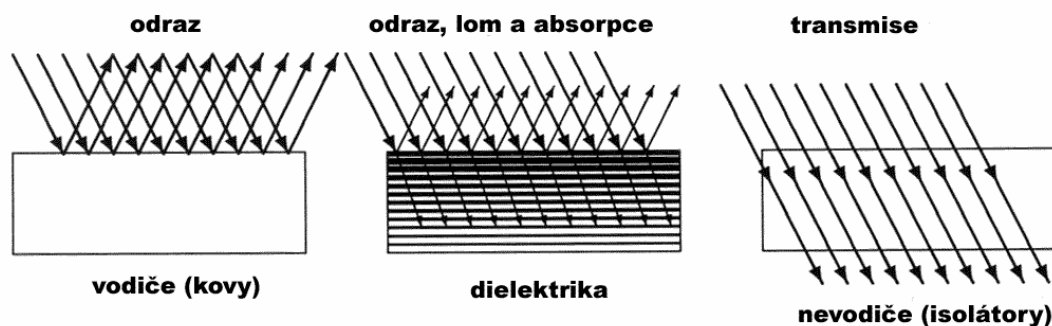
Výhodou mikrovln oproti konvenčnímu ohřevu je současný ohřev materiálu v celém objemu. Ze všech druhů ohřevu je pouze dielektrickým ohřevem (tj. ohřevem na vysokých kmitočtech včetně mikrovln) vyvolat vyšší teplotu uvnitř vzorku než na povrchu.

Dalšími podstatnými výhodami jsou rovněž rychlost a dokonalost prohřátí a absorpce téměř veškeré MW energie v ohřívaném materiálu. Vysoká homogenita rozložení teploty,

rychlý náběh na potřebnou teplotu v celém objemu, přesná regulace teploty a vysoká energetičnost, typická pro MW ohřev, zpravidla není současně dosažitelná jinými způsoby ohřevu.

Gumárenská výroba je všeobecně považována za energeticky náročnou a proto se právě energie stává z velké části jednou z důležitých položek výrobní ceny [7] gumárenských výrobků. MW ohřev gumárenských směsí je prostředkem značné úspory energie i času.

Pro MW ohřev jsou nejvhodnější materiály s pokud možno vysokou hodnotou tzv. ztrátového činitele, jaký má např. voda nebo jiné polární molekuly, např. soli, uhlík apod., přítomné i v malých množstvích. Materiály bez bipolárního elektrického náboje, jako např. některé plasty, na mikrovlny nereagují [6].



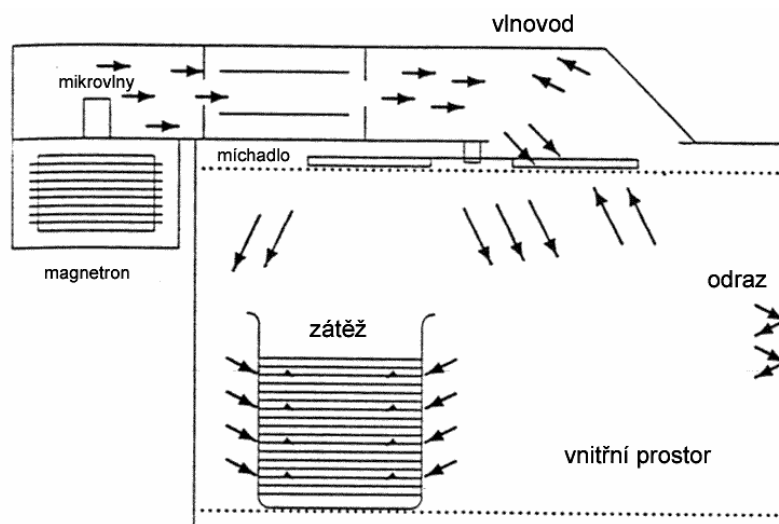
Obr. 11. Reakce rozlišných materiálů na mikrovlny [9]

5 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ

Mikrovlny podobně jako světelné nebo rozhlasové vlny zaujímají část elektromagnetického spektra.

Ve věku moderní technologie jich využíváme k dálkovému přenosu telefonu, televizních programů, radarových zařízení a počítačových informací ať už na zemi či prostřednictvím satelitů. Ale nejznámější jsou nám jako zdroj energie k ohřívání nebo vaření jídla. Od roku 1990, kdy tento přístroj vtrhl na náš trh, jej má víc jak 90% rodin v ČR. Každá mikrovlnná trouba obsahuje takzvaný magnetron, speciální elektronku, v níž magnetická a elektrická pole působí na elektrony tak, aby produkovala záření v mikrovlnném spektru okolo 2450 MHz. Takto vyprodukované mikrovlnné záření působí na molekuly ohřívávaného produktu. Všechny energetické vlny mění svou polaritu z pozitivní na negativní, a to při každém cyklu vlny. U mikrovln k těmto změnám dochází nesčetněkrát za sekundu. Molekuly - obzvláště molekuly vody - mají pozitivní a negativní "konce", obdobně jako severní a jižní pól magnetu. Jsou tedy dvoupólové - bipolární. Běžné typy mikrovlnek mají příkon asi 1000 wattů střídavého proudu. Magnetronem generované mikrovlny bombardující produkt nutí bipolární molekuly, aby ve snaze přizpůsobit se jejich frekvenci rotovaly miliónkrát za vteřinu. "Zmítání" molekul přímo uvnitř produktu vyvolá třecí teplo, které ho vaří zevnitř. Násilím vyvolané molekulární tření ovšem současně značně poškozuje strukturu všech okolních molekul; nezřídka je úplně roztrhá nebo přinejmenším značně deformuje.

Pro porovnání. Zatímco tvorba tepla přicházejícího ze Slunce spočívá na principu pulsujícího stejnosměrného proudu (DC), mikrovlnné trouby užívají k jeho vytvoření střídavý proud (AC). Magnetron v troubě navíc produkuje špičky vlnových délek energie ve velmi zúžené frekvenci energetického spektra, zatímco sluneční přichází v širokém kmitočtovém pásmu [8].



Obr. 12. Schéma mikrovlnného zařízení

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ PLÁNU PRAKTICKÉ ČÁSTI

Při hledání a sestavování plánu experimentu byla věnována pozornost efektivnímu provedení experimentu. Plán experimentu zahrnuje: cíl experimentu, program experimentu a v poslední řadě analýzu získaných výsledků.

1. Cíl experimentu

- využití MW technologie pro ohřev kaučuku,
- zhodnocení efektivnosti DE ohřevu v gumárenském průmyslu, z hlediska rychlosti a úspory elektrické energie,
- zhodnocení návratnosti investice při pořízení mikrovlnného zařízení.

2. Program experimentu

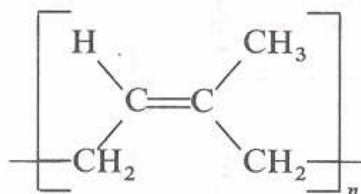
- volba kaučuků a kaučukových směsí ,
- popis zvolených strojů a zařízení,
- DE ohřev kaučuků,
- ohřev kaučuků vedením,
- ohřev kaučuků sáláním,
- ohřev kaučuků prouděním ,
- měření teplotní a tepelné vodivosti.

3. Analýza výsledků

- shrnutí a vyhodnocení rychlosti jednotlivých ohřevů ,
- ekonomické vyhodnocení.

7 POUŽITÉ MATERIÁLY

7.1 Přírodní kaučuky (PK)



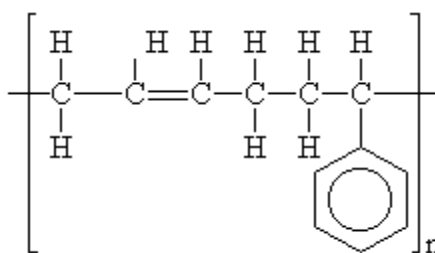
Obr. 13. Chemický vzorec přírodního kaučuku

- měkne při 120 °C,
- při 200 °C přechází na hnědou kapalinu, dále se rozkládá,
- dá se chlorovat na chlorkaučuk
- odolnost proti dalšímu natržení a únavě při větších deformacích [16].

Přírodní kaučuk má všeobecné použití pro svou vysokou odolnost proti oděru, velkou odrazivost. Málo se zahřívá při dynamickém namáhání, má výbornou „konfekční lepivost“ a dobře vulkanizuje [5]. K měření byly použity vzorky přírodních kaučuků SMR 10 MR , STR 20 BD, SIR 20 SED o rozměrech 50 x 50 x 50 mm.

7.2 Syntetické kaučuky

7.2.1 Butadienstyrenové kaučuky(Kralex, Buna)



Obr. 14. Chemický vzorec butadienstyrenového kaučuku

- Příznivá odolnost proti opotřebení a stárnutí, zvláště při teplotách nad 70 °C,
- Dobrá pevnost a tažnost, uspokojivá odolnost proti únavě při opakovaných malých deformacích,
- Dobrá strukturální pevnost a dynamické vlastnosti, odrazová pružnost[16].

K měření byly použity vzorky kaučuků Kralex a Buna o rozměrech 50 x 50 x 50 mm.

7.2.2 Butylkaučuky(IIR)

Vlastnosti butylových kaučuků(IIR):

- tepelná stabilita,
- odolnost proti vlhkosti, kyselinám, alkáliím a organickým kyslíkatým sloučeninám(alkoholy, ketony),
- tlumení vibrací a vysoký koeficient tření
- velmi malá propustnost pro plyny
- použití nachází zejména k výrobě veloduší [16] .

K měření byly použity vzorky butylkaučuku IIR o rozměrech 50 x 50 x 50 mm.

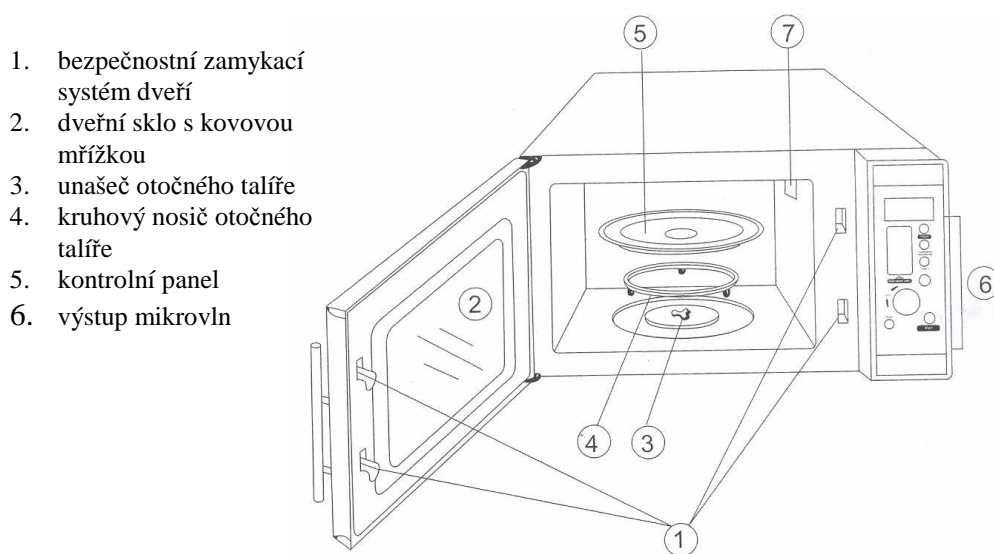
8 STROJE A ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY

8.1 Digitální mikrovlnné zařízení PROFESSOR MTE – 235 BX - ROMILL

Základní parametry:

- obsah 24 litrů,
- výkon 900 W, příkon 1400 W,
- frekvence mikrovln 2450 Hz,
- vnitřní rozměry 215 (výška) x 350 (šířka) x 330 (hloubka) mm,
- vnější rozměry 305 (výška) x 508 (šířka) x 420 (hloubka) mm.

Vyobrazení a popis jednotlivých částí mikrovlnného zařízení PROFESSOR MTE – 235BX je znázorněn na Obr. 15. Toto zařízení sloužilo pouze jako ohřevná komora a jako zdroj mikrovln sloužilo zařízení od fy Romill, spol. s r. o., Brno o příkonu 1100W a výkonu 900W. Zařízení jsou znázorněna na Obr. 16.



Obr. 15. Vyobrazení a popis mikrovlnné trouby PROFESSOR MTE –235 BX



Obr. 16. Zařízení pro mikrovlnný ohřev(k horní části zařízení Professor MTE-235 BX je připojen další zdroj mikrovln Romill)

8.2 Laboratorní vulkanizační lis

Lis pro vulkanizaci výrobků z pryže. Výrobcem je firma Mitas. Základní technické parametry:

- dotyková plocha obou ohřevných desek vulkanizačního lisu má rozměry 300 (šířka) x 250 (hloubka) mm,
- vnější rozměry 305 (výška) x 508 (šířka) x 420 (hloubka) mm.
- příkon 1100 W,



Obr. 17. Laboratorní vulkanizační lis

8.3 Vakuový tvářecí stroj FORMECH 300X

Vakuový tvářecí stroj Formech 300X sloužil k ohřevu sáláním a vyrobila jej firma RS Print & Kunststofftechnik GmbH(Německo). Základní technické parametry:

- vnitřní rozměr 450 (šířka) x 300 (hloubka) mm,
- vnější rozměry 550 (výška) x 650 (šířka) x 1100 (hloubka) mm.
- příkon 2000 W,



Obr. 18. Vakuový tvářecí přístroj FORMECH 300X

8.4 Horkovzdušná komora STE 39(sušárna)

Výrobce této horkovzdušné komory byla společnost Chirana n.p.(Stará Churá). Základní technické parametry:

- obsah komory je 85 l
- příkon 2200 W,
- vnitřní rozměr 440 (výška) x 550 (šířka) x 350 (hloubka) mm,
- vnější rozměry 760 (výška) x 870 (šířka) x 460 (hloubka) mm.



Obr. 19. Horkovzdušná komora STE 39

9 PROGRAM PRAKTICKÉ ČÁSTI

Jako hlavní parametr, kterého bych měl dosáhnout jednotlivými druhy ohřevů jsem stanovil teplotu vzorku $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9.1 Dielektrický ohřev kaučuků za normální teploty

Postup měření při ohřívání kaučuku MW technologií:

Pro mikrovlnný ohřev bylo použito více druhů kaučuků a to:

- přírodní kaučuky - SMR 10 MR , STR 20 BD, SIR 20 SED
- syntetické kaučuky - Kralex, Buna a Butylkačuk(IIR)

Vzorky kaučuků ve tvaru krychle o rozměrech 50 x 50 x 50 mm a průměrné hmotnosti $m = 180\text{ g}$ byly ohřívány v mikrovlnném zařízení PROFESSOR MTE-235 - Romill (Obr.16.). Každý vzorek byl zahříván ve zvoleném čase $t = 3, 5, 8$ případně 10 min při výkonu $P = 60\%$.

Vzhledem k rychlosti MW ohřevu byly ohřívány 4ks od každého druhu kaučuků, které byly rovnoměrně rozloženy na ohřívací podložce. Po každém časovém úseku byly vzorky vyjmuty a ve třech místech byly změřeny teploty, které byly následně zprůměrnovány. Ohřev byl prováděn v daných časových intervalech do doby, kdy dosáhne předem stanovenou teplotu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

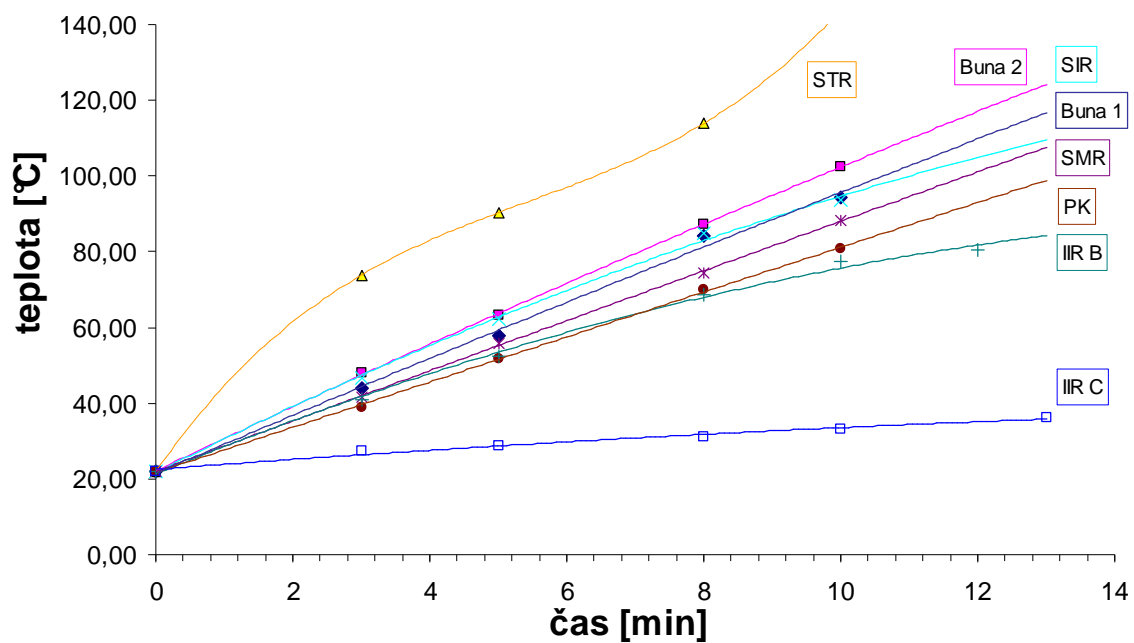
Podmínky měření:

- průměrná vstupní teplota vzorků (teplota kaučuku před ohřevem) $T_1 = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- homogenizace kaučukových vzorků, tj vložení vzorku do mikrovlnného zařízení a po stanovených časových intervalech ohříván při 60 % (630W) výkonu magnetronu.

Naměřené a vypočtené hodnoty mikrovlnného ohřevu kaučuků jsou uvedeny v příloze P 1.



Obr. 20. Ukázka ohřevu kaučuků v MW zařízení



Obr. 21. Dielektrický ohřev kaučuků

9.2 Ohřev kaučuků vedením

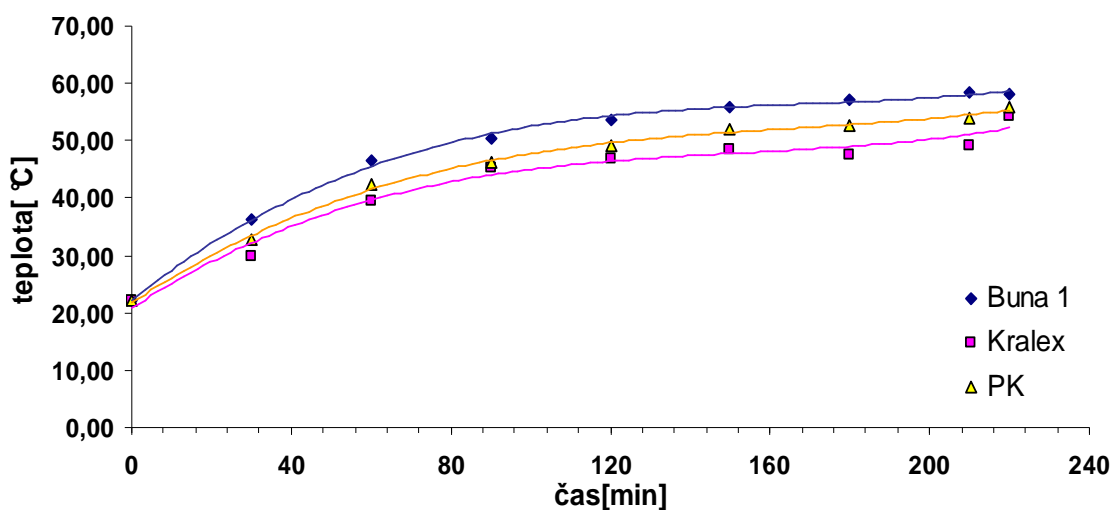
Postup měření při ohřívání kaučuku vedením:

Vzorky kaučuků (SIR 20SED, Kralex, Buna) ve tvaru krychle o rozměrech 50 x 50 x 50 mm a průměrné hmotnosti $m = 180$ g byly ohřívány ve vulkanizačním lisu pouze spodní ohřevnou deskou jež byla vytemperována na požadovanou teplotu 80 °C . Teplota byla zjišťována ve třech různých místech a následně byla zprůměrnována. Rozložení měřených vzorků kaučuků bylo po obvodu lisovací desky vulkanizační lisu Obr. 22.

Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků vedením jsou uvedeny v příloze P 2.



Obr. 22. Ohřev vedením ve vulkanizačním lisu



Obr. 23. Ohřev kaučuků vedením

9.3 Ohřev kaučuků prouděním

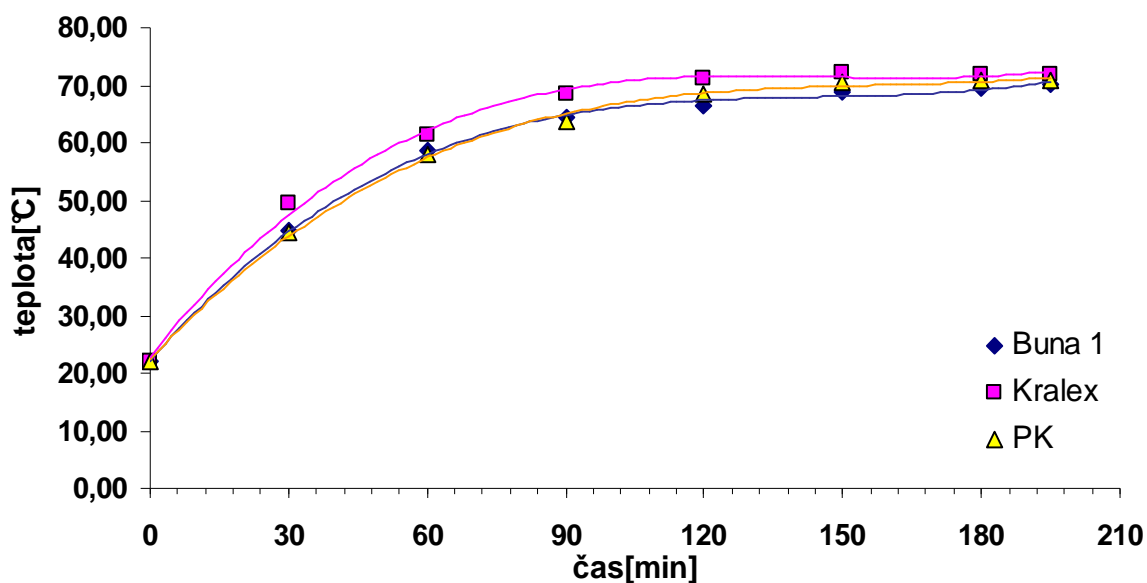
Postup měření při ohřívání kaučuku prouděním tepla:

Vzorky kaučuků (SIR 20SED, Kralex, Buna) ve tvaru krychle o rozměrech 50 x 50 x 50 mm a průměrné hmotnosti $m = 180$ g byly ohřívány v horkovzdušné komoře jež byla vytemperována na požadovanou teplotu 80 °C. Teplota byla zjišťována ve třech různých místech a následně byla zprůměrnována. Rozložení měřených vzorků kaučuků bylo ve dvou řadách viz. Obr. 24.

Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků prouděním jsou uvedeny v příloze P 3.



Obr. 24. Ohřev prouděním v horkovzdušné komoře

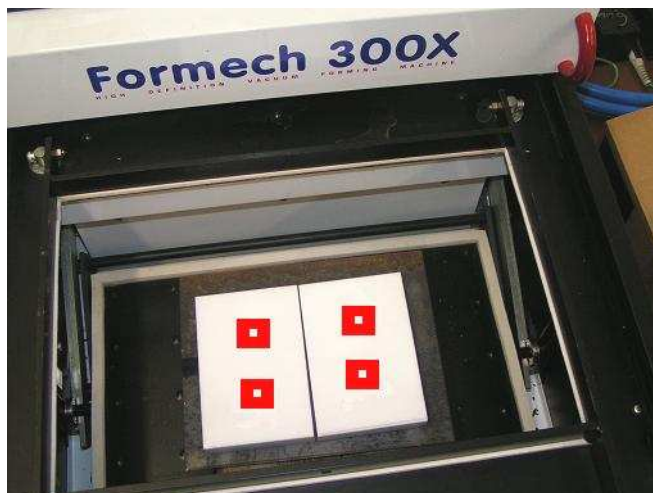


Obr. 25. Ohřev kaučuků prouděním

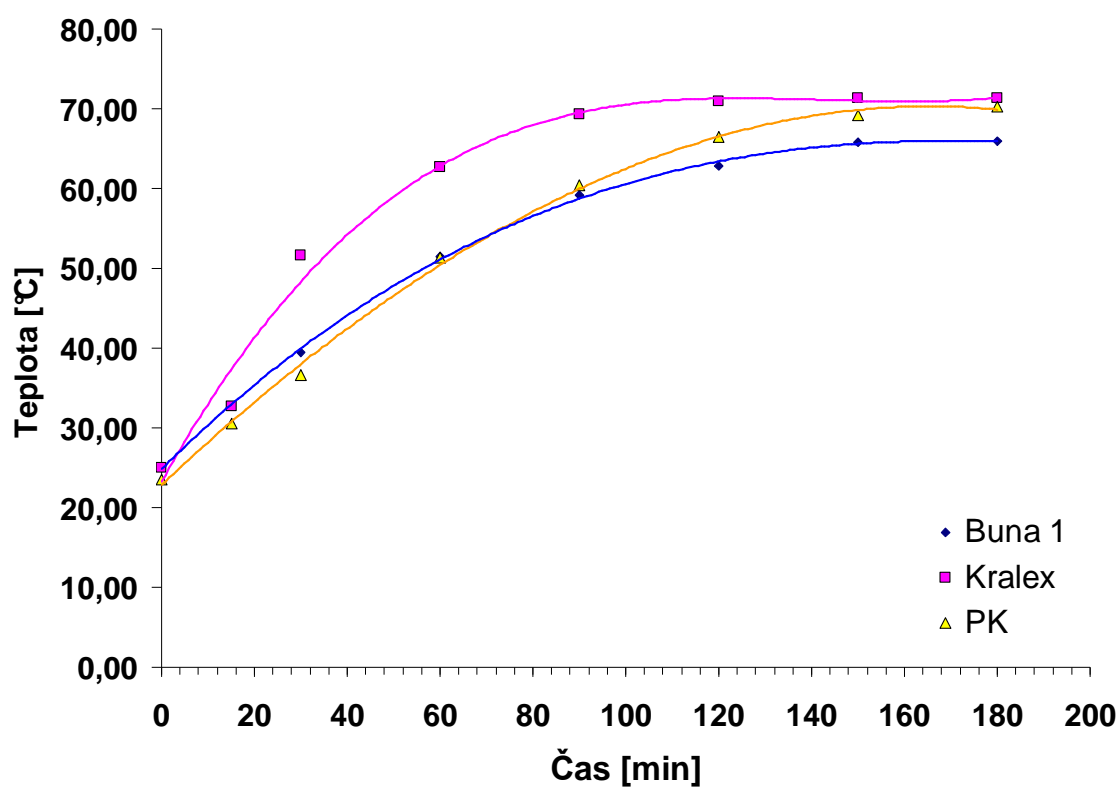
9.4 Ohřev kaučuků sáláním

Postup měření při ohřívání kaučuku sáláním tepla:

Vzorky kaučuků (SIR 20SED, Kralex, Buna) ve tvaru krychle o rozměrech 50 x 50 x 50 mm a průměrné hmotnosti $m = 180$ g byly ohřívány ve vakuovém tvářecím zařízení Formech 300X, jež bylo v místě, kde byly ohřívány vzorky umístěny vytemperována na teplotu 80 °C. Teplota byla zjišťována ve třech různých místech vzorku a následně byla zprůměrnována. Rozložení ohříváných vzorků kaučuků je vyobrazeno barevně na Obr. 26. Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků sáláním jsou uvedeny v příloze P 4.



Obr. 26. Rozložení vzorků při ohřevu sáláním



Obr. 27. Ohřev kaučuků sáláním

9.5 Stanovení teplotní a tepelné vodivosti (a , λ)

Postup měření a a λ :

K měření bylo potřeba dvou kapalinových termostatů naplněných vodou a opatřených zařízením k dosažení intenzivního proudění vody kolem zkušebního hranolu (SIR 20SED a SBR 1712). Měření teplotní vodivosti se provedlo tak, že měřený kaučuk ve tvaru zkušebního tělíška ve tvaru hranolu o rozměrech 15 x 70 x 10 mm byl vytemperován v prvním termostatu na konstantní teplotu 27 °C, potom byl umístěn do druhého termostatu temperovaného na konstantní teplotu 55 °C. Pomocí termočlánku umístěného uprostřed hranolu kaučuku byl zjištěna závislost teploty na čase. Měření bylo provedeno dvakrát pro rostoucí teplotu a dvakrát pro klesající teplotu.

K popisu sdílení tepla vedením se používají dva parametry: tepelná vodivost a teplotní vodivost, které spolu souvisí vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (20)$$

, z kterého vyplývá, že:

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho \quad (21)$$

kde a je teplotní vodivost, m^2s^{-1}

λ tepelná vodivost, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

ρ hustota, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

c_p měrné teplo za stálého tlaku, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Do grafu byl nanesen $\ln(T_2 - T)$ (T_2 – teplota termostatu, T – teplota vzorku) tj. přirozený logaritmus vzdálenosti od ustálené hodnoty, v závislosti na čase t . Po proložení bodů přímkou byla odečtena směrnice a_2 závislosti

$$\ln(T_2 - T) = a_1 + a_2 t \quad (22)$$

Teplotní vodivost pak vypočteme ze vztahu

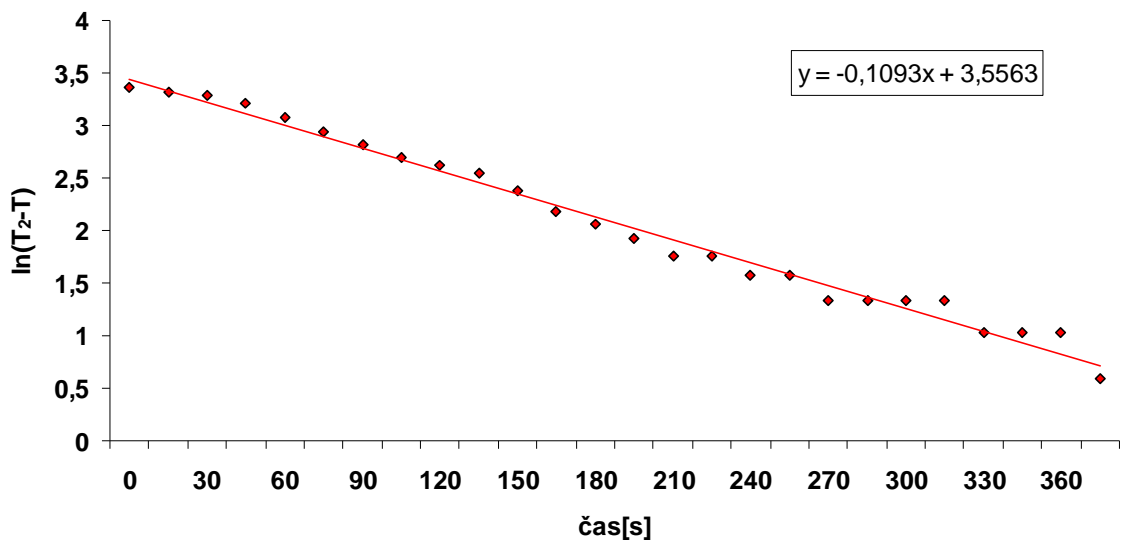
$$a = -a_2 K \quad (23)$$

Výpočet rozměrové konstanty pro použité tělíško:

$$K = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{b_1^2} + \frac{1}{b_2^2} + \frac{1}{b_3^2} \right) \right]} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{0,0355^2} + \frac{1}{0,0075^2} + \frac{1}{0,005^2} \right) \right]} = 9,74012375810^{-6} m^2 (24)$$

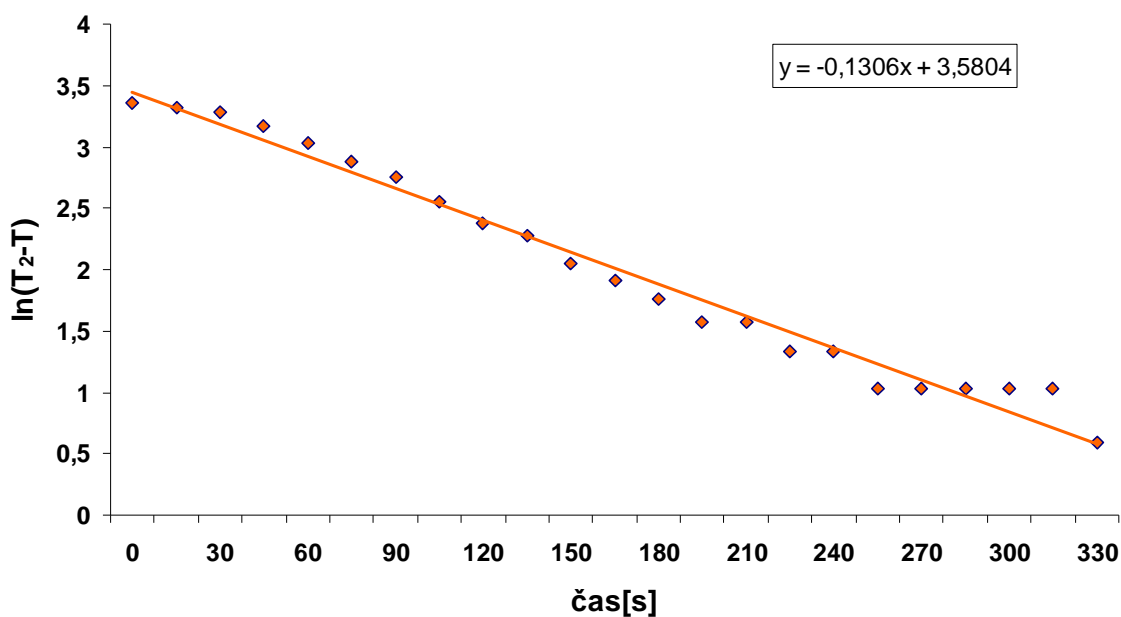
Stanovení tepelných koeficientů pro SIR 20 SED a SBR 1712 při ohřevu (naměřené a vypočtené hodnoty použité ke stanovení tepelných koeficientů jsou uvedeny v příloze P 5):

Linearizovaná regrese - ohřev PK



Obr. 28. Graf linearizované regrese ohřevu vzorku SIR 20SED

Linearizovaná regrese - ohřev SBR



Obr. 29. Graf linearizované regrese ohřevu vzorku SBR 1712

Z grafů(Obr. 28. a 29.) byla odečtena směrnice a_2 a vypočteno:

Tab. 2. Teplotní koeficienty a naměřené hodnoty vzorků

Vzorek	směrnice a_2	rozměrová konstanta $K [m^2]$	teplotní vodivost a $[m^2 s^{-1}]$	měrné teplo C_p $[Jkg^{-1}K^{-1}]$	hustota ρ $[kg.m^{-3}]$	tepelná vodivost λ $[Wm^{-1}K^{-1}]$
SIR 20 SED	0,1093	$9,74 \cdot 10^{-6}$	$1,0646 \cdot 10^{-6}$	2500,80	920	2,45
SBR 1712	0,1306	$9,74 \cdot 10^{-6}$	$1,27206 \cdot 10^{-6}$	2585,10	970	3,19

10 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Účelem experimentů bylo posoudit i rychlosti jednotlivých druhů ohřevů. Výsledné naměřené hodnoty jsou v příloze P6 a souhrnné grafické znázornění všech druhů ohřevů je na obr. 30. Vzhledem k rozdílné rychlosti jednotlivých druhů ohřevů bylo pro DE ohřev MW technologií použito větší množství vzorků druhů kaučuků. Pro časově náročnější měření ohřevů vedením, prouděním a sáláním bylo použito vzorků SIR 20 SED(přírodní kaučuk), Kralex a Buna (butadienstyrenové kaučuky).

Jednotlivé zkoušky, jejich podmínky a parametry jsou popsány v kapitole 9.

Vyhodnocení výsledků je rozděleno do níže uvedených oblastí.

10.1 Dielektrický ohřev

Z grafického průběhu měření, který je znázorněn na Obr. 30. je patrné, že DE ohřevem v mikrovlnném zařízení lze dosáhnout požadované teploty průměrně během 11 minut. Ohřívání vzorek je rovnoměrně ohříván.

10.2 Ohřev prouděním

Ohřev prouděním v horkovzdušné komoře se stal druhým nejrychlejším ohřevem v pomyslném pořadí, ale v průměru dosáhl pouze maximální teploty $T = 70,79\text{ }^{\circ}\text{C}$. K získání této teploty bylo potřeba času $t = 180\text{ [min]}$, což je ve srovnání s DE ohřevem 16 x více času.

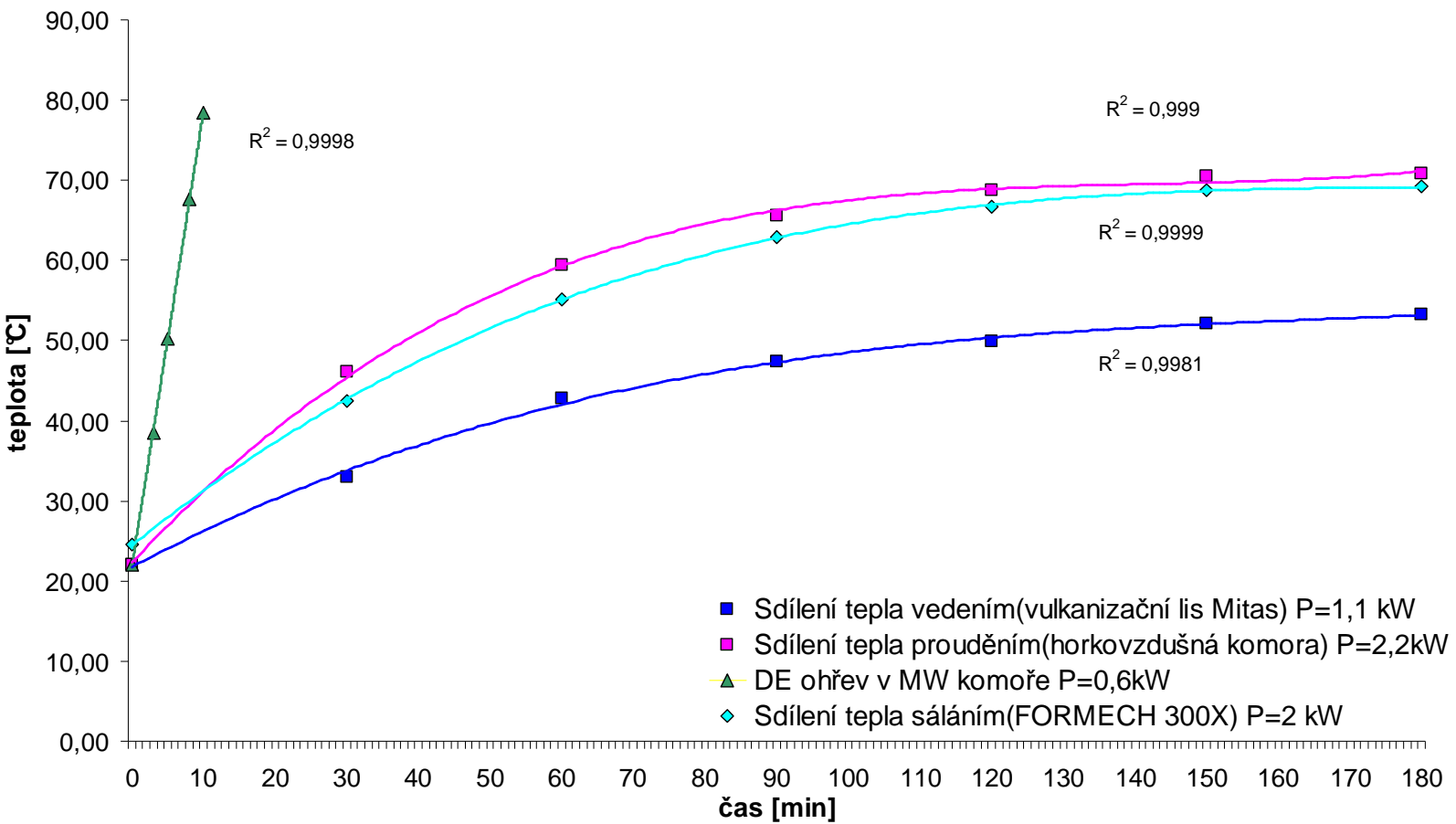
10.3 Ohřev sáláním

Ohřev ve vakuovém tvářecím přístroji probíhal ve srovnání s ohřevem prouděním v horkovzdušné komoře podobně. Průměrná dosažená teplota činila po čase $t = 180\text{ [min]}$ $T = 69,17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10.4 Ohřev vedením

Měřením ohřevu vedením ve vulkanizačním lisu bylo dosaženo průměrné teploty vzorků pouze $T = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podle průběhu a následného grafického znázornění (Obr. 30) bylo

zjištěno, že daný způsob ohřevu je nedostačující pro naše měření a pro další ekonomické výpočty nebyl použit.



Obr. 30. Výsledné srovnání ohřevů kaučuků různými zdroji tepla

11 ZHODNOCENÍ INVESTICE MW TECHNOLOGIE Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

11.1 Vliv MW ohřevu na náklady a tržby:

1. Zkrácení výrobní doby, až o 70-85 %.
2. Zkrácení časů potřebných na vlastní operaci, ale také na naplnění a vyprázdnění je hlavním faktorem zvýšení výrobní kapacity.
3. Úspory elektrické energie jsou proti konvenčním metodám běžně v rozmezí 25-50 % .
4. energetická náročnost nejvýznamněji ovlivní úsporu celkových přímých provozních nákladů.
5. Menší nároky na prostor a kratší doba instalace.
6. Nenáročná údržba.
7. Investiční náklady

11.2 Výpočet návratnosti investice

Při rozhodování o dlouhodobých investicích musí tedy podnik zvážit jejich cíl a zpracovat více variant jeho řešení. Jedním z ukazatelů, podle kterých se výsledná varianta vybírá, je ukazatel efektivnosti investic.

Ukazatel efektivnosti se stanoví jako poměr ročního odpisu a ročního přínosu z investice k pořizovací ceně investice.

$$E = \frac{\text{roční odpis} + \text{roční přínos z investice}}{\text{pořizovací cena HIM}} \quad (25)$$

Dalším důležitým ukazatelem rozhodování o investici nákupu je ukazatel návratnosti investice v letech.

$$N = \frac{\text{pořizovací cena HIM}}{\text{roční přínos z investice} + \text{roční odpis}} \quad (26)$$

11.3 Mikrovlnné zařízení

Základní parametry:

Tab. 3. Technické parametry

Mikrovlnné zařízení	
využitelný prostor	1300 x 1500 x 1800 [mm]
objem komory	10,1 [m ³]
frekvence	2,45 [GHz]
výkon zařízení	24 [kW]
počet magnetronů	30 [ks]

- náklady na pořízení 1 mikrovlnného zařízení : 1,6 mil. Kč
- doba pro ohřev cca 1000 kg kaučuku: 60 min.

11.3.1 Výpočet efektivity a návratnosti investice:

Pro výpočet bereme v úvahu koupi šesti mikrovlnných zařízení.

- pořizovací cena = 9.600.000,-- Kč
- roční odpis = 1.600.000,-- Kč
- roční zisk = 1.440.000,-- Kč (15 % z pořizovací ceny)

$$E = \frac{1.600.000 + 1.440.000}{9.600.000} = 0,32 \text{ Kč}$$

$$N = \frac{9.600.000}{1.600.000 + 1.440.000} = 3,13 \text{ Kč}$$

Při zhodnocení výsledku výpočtu ukazatele efektivnosti můžeme konstatovat, že jedna koruna vynaložená na pořízení mikrovlnného zařízení přinese Kč 0,32.

Ukazatel návratnosti nám vypovídá o tom, za jak dlouho dojde k vyrovnání peněžních prostředků vložených do investice. Z uvedeného výpočtu vyplývá, že návratnost investice je 3 roky 50 dní.

11.4 Komora pro předeřev kaučuku horkým vzduchem

Základní parametry:

- využitelný prostor: 5000 x 5000 x 5000 mm,
- objem komory: 125 m³,
- doba pro ohřev cca 1000 kg kaučuku: 3 dny,
- kapacita komory: 120 tun,
- investiční náklady: viz tab. 4.

Tab. 4. Investiční náklady na horkovzdušnou komoru

Investiční náklady [Kč]		
Technologické náklady	ventilátory	400.000,--
	potrubí	740.000,--
	el. rozvody	350.000,--
Náklady na výstavbu		600.000,--
Celkové inv. náklady		2.090.000,--

11.4.1 Výpočet efektivnosti a návratnosti investice:

- pořizovací cena = 2.090.000 Kč,-- Kč
- roční odpis = 350.000,-- Kč
- roční zisk = 314.000,-- Kč (15 % z pořizovací ceny)

$$E = \frac{350.000 + 314.000}{2.090.000} = 0,31Kč$$

$$N = \frac{2.090.000}{350.000 + 314.000} = 3,14Kč$$

Pro zhodnocení výsledku výpočtu ukazatele efektivnosti na pořízení horkovzdušné komory můžeme konstatovat, že jedna koruna vynaložená na pořízení přinese 0,31 Kč a investice by se měla vrátit za 3 roky.

Výpočty se vztahují pouze na pořízení uvedených zařízení. Nejsou zde obsaženy další důležité náklady (např. provozní), se kterým je nutné počítat.

11.5 Srovnání kapacity jednotlivých zařízení

Tab. 5. Srovnání kapacity jednotlivých zařízení

Ohřev kaučuků		
Zařízení	Kapacita [kg]	doba ohřevu [h]
MW zařízení (6 ks)	6.000	1
Horkovzdušná komora	120.000	72 [3 dny]

Důležitým nástrojem pro další hodnocení je výše uvedený fakt (Tab.5), že doba potřebná k ohřátí 120 tun kaučuku pomocí horkého vzduchu v předehřívací komoře je 3 dny, tudíž lze na základě informací uvedených v tabulkách konstatovat, že mikrovlnné zařízení by potřebovalo pro ohřev stejného množství kaučuku 20 h. To znamená, že za 3 dny by mikrovlnné zařízení ohřálo 432 tun směsi. Pro srovnání lze tedy říci, že výkon mikrovlnného zařízení vzhledem k danému množství je 3,6 x vyšší než u uvedené horkovzdušné předehřívací komory. Tato skutečnost se příznivě odrazí i v celkových nákladech na ohřev kaučuku.

Dalším významnou skutečností stále zůstává, že předehřívací komora není schopna ohřevu kaučuků v jeho celém objemu a některé palety se musí opětovně předehřívát až k dosažení optimální teploty ke zpracování.

Je nutné brát v úvahu, že veškeré výpočty uvedené v této kapitole jsou pouze orientační. Pro další rozbor je nutné shromáždit více informací a provést důkladné analýzy, jež by zahrnovaly i ostatní náklady, ale také rozbor úspor elektrické energie jednotlivých zařízení.

Veškeré údaje uvedené v této části, jsou ze zdrojů poskytnutých od firem: Phoenix, GmbH, Hamburg; Barum Continental, spol. s r.o. a Romill, s.r.o.

12 ZÁVĚR

Účelem bakalářské práce bylo vyšetřit výkonnost dielektrického ohřevu kaučuků oproti konvenčním ohřevům a ekonomické výhody tohoto ohřevu. Obsah bakalářské práce je rozdělen do dvou základních částí.

Hlavním úkolem první části bylo studium odborné literatury, týkající se kaučuků, procesů přenosů tepla při jejich zpracování a v poslední řadě aplikace použití mikrovlnné technologie v gumárenském průmyslu. Teoretické poznatky získané studiem odborné literatury byly použity v druhé části, jejíž nedílnou součástí bylo nejprve zvolení plánu experimentu.

Plán experimentu je rozdělen do tří částí:

1. Cíl experimentu

- využití MW technologie pro ohřev kaučuku,
- vyhodnotit efektivnost DE ohřevu v gumárenském průmyslu
- zhodnocení návratnosti investice při pořízení MW zařízení

2. Program experimentu

Experiment byl prováděn v laboratorních podmínkách a jako jednotlivé dílčí experimenty ohřevu kaučuku byly použity: DE ohřev a ohřev vedením, sáláním a prouděním. 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.

3. Analýza výsledků

Měření a následným zpracováním hodnot bylo potvrzeno, že DE ohřev MW technologií je několikanásobně rychlejší a tím i energeticky méně náročnější nežli konvenční způsoby ohřevu. Ohřevem vedením dokonce nebylo dosaženo předem stanovené teploty a z toho důvodu nebyl dále použit. 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.

Veškeré ekonomické výpočty uvedené v této práci jsou pouze orientační a ukazují směr postupu hodnocení ekonomické stránky dané problematiky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FRANTA, Ivan. *Gumárenské suroviny I. : Gumárenské suroviny*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství technické literatury, 1979.
- [2] FRANTA, Ivan. *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*. 2. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1969. 606 s.
- [3] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie*. Přednášky.
- [4] BARUM CONTINENTAL, spol. s. r. o. *Gumárenská technologie*. Učební texty. 2004.
- [5] STOKLASA, Karel. *Vlastnosti polymerních materiálů : Dielektrické vlastnosti*. [s.73.], 78 s. Přednášky
- [6] *Romill-Krmivářské stroje : Průmyslový mikrovlnný ohřev* [online]. 2000 [cit. 2005-12-03]. Dostupný z WWW: <www.romill.cz>.
- [7] 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.
- [8] *Elektromagnetické pole* [online]. [1999] [cit. 2005-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrotechnika.cz/zaklady/prncp040426.html>>.
- [9] *Spectrum of electromagnetic waves* [online]. [2000] [cit. 2005-05-01]. Dostupný z WWW: <www.google.com>.
- [10] ČERNÝ, Václav. Elektrický ohřev. *Elektro*. 2003, č. 3, s. 57.
- [11] MLEZIVA, Josef, ŠNUPÁREK , Jaromír. *Polymery : výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vyd. Praha : Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 80-85920-72-7
- [12] STOKLASA, Karel. *Polymerní materiály*. Přednášky
- [13] DVOŘÁK, Zdeněk; SVOBODA, Ivan. *Fenomén energie a jejich podíl na výrobě gumárenských výrobků*. Přednášky
- [14] CHEN, M., et al. Basic Ideas of microwave processing of polymers. *Polymer engineering and science*. 1993, vol. 33, no. 17, s. 21.
- [15] JANÁČOVÁ, Dagmar; BLAHA, Antonín. *Procesní inženýrství*. Přednášky

- [16] *Gumárenské směsi* [online]. [2006] [cit. 2007-05-01]. Dostupný z WWW:
<<http://www.cgs.cz/index.php?stranka=4&scid=65&PHPSESSID=4054eb424a6abd92c6b82319be000eaf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MW	-	mikrovlny (microwave)
PK	-	přírodní kaučuk
SBR	-	styrenbutadienový kaučuk
IR	-	butadien akrylonitrilový kaučuk
IIR	-	butylkaučuk
NBR	-	nitrobutadienový kaučuk
NR	-	přírodní kaučuk
EPDM	-	etylen – propylenový kaučuk
CR	-	chlorobutadienový kaučuk
RSS	-	uzený kaučuk
°C	-	stupeň Celsia
DE	-	dielektrický ohřev
RF	-	radiová frekvence
ϵ_r	-	relativní permitivita (-)
ϵ_0	-	permitivita vakua [$8,854 \cdot 10^{-12}$]
$\text{tg } \delta$	-	fázový úhel
C	-	kapacita kondenzátoru [F]
S	-	plocha [m^2]
d	-	vzdálenost desek kondenzátoru [m]
g	-	vodivost jednotkové krychle [S/m]
G	-	výsledná vodivost [S/m]
ω	-	úhlová rychlost [s^{-1}]
ρ	-	rezistivita (měrný odpor) [$\Omega \cdot \text{m}$]
γ	-	konduktivita (měrná vodivost) [S/m]

I	-	proud [A]
U	-	napětí [V]
P	-	výkon [W]
A	-	práce [J]
α	-	relaxace při nízkých kmitočtech
β	-	relaxace při vysokých kmitočtech
DC	-	stejnoseměrný proud [A]
AC	-	střídavý proud [A]
T _g	-	teplota skelného přechodu [°C]
\varnothing	-	průměr [m, mm]
T	-	teplota [°C]
m	-	hmotnost [kg]
$\bar{\mu}$	-	dipólmoment polární látky [C.m]
Q	-	náboj [C]
l	-	vzdálenost nábojů [m]
m	-	dipólmoment nepolárních látek [V m]
E	-	intenzita elektrického pole [V m]
E	-	efektivnost [Kč]
N	-	návratnost [Kč]
ϵ_{∞}	-	deformační polarizace
λ	-	tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]
a	-	teplotní vodivost [m ² s ⁻¹]
K	-	rozměrová konstanta [m ²]
c _p	-	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	-	hustota [kg.m ⁻³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma mechanismu sdílení tepla.....	13
Obr. 2. rozdělení teploty t napříč deskou(teplotní profil)	14
Obr. 3. průběh přestupu tepla u proudění	15
Obr. 4. schéma realizace sdílení tepla.....	15
Obr. 5. dopad zářivého toku na těleso.....	16
Obr. 6. Molekuly při MW ohřevu	18
Obr. 7. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem.....	19
Obr. 8. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem.....	19
Obr. 9. Fázový diagram dielektrických ztrát.....	20
Obr. 10. Oblasti spektra elektromagnetického záření [9]	24
Obr. 11. Reakce rozlišných materiálů na mikrovlny [9].....	25
Obr. 12. Schéma mikrovlnného zařízení	27
Obr. 13. Chemický vzorec přírodního kaučuku.....	30
Obr. 14. Chemický vzorec butadienstyrenového kaučuku.....	30
Obr. 15. Vyobrazení a popis mikrovlnné trouby PROFESSOR MTE –235 BX.....	32
Obr. 16. Zařízení pro mikrovlnný ohřev(k horní části zařízení Professor MTE-235 BX je připojen další zdroj mikrovln Romill)	33
Obr. 17. Laboratorní vulkanizační lis	34
Obr. 18. Vakuový tvářecí přístroj FORMECH 300X.....	35
Obr. 19. Horkovzdušná komora STE 39.....	35
Obr. 20. Ukázka ohřevu kaučuků v MW zařízení	37
Obr. 21. Dielektrický ohřev kaučuků.....	37
Obr. 22. Ohřev vedením ve vulkanizačním lisu	38
Obr. 23. Ohřev kaučuků vedením	39
Obr. 24. Ohřev prouděním v horkovzdušné komoře	39
Obr. 25. Ohřev kaučuků prouděním	40
Obr. 26. Rozložení vzorků při ohřevu sáláním.....	41
Obr. 27. Ohřev kaučuků sáláním	41
Obr. 28. Graf linearizované regrese ohřevu vzorku SIR 20SED	43
Obr. 29. Graf linearizované regrese ohřevu vzorku SBR 1712	44
Obr. 30. Výsledné srovnání ohřevů kaučuků různými zdroji tepla.....	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Relativní permitivity a činitele ztrát některých materiálů [10].....	23
Tab. 2. Teplotní koeficienty a naměřené hodnoty vzorků	44
Tab. 3. Technické parametry.....	48
Tab. 4. Investiční náklady na horkovzdušnou komoru	49
Tab. 5. Srovnání kapacity jednotlivých zařízení.....	50

SEZNAM PŘÍLOH

- P 1 Tab. I. Naměřené a vypočtené hodnoty mikrovlnného ohřevu kaučuků
- P 2 Tab. II. Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků vedením
- P 3 Tab. III. Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků prouděním
- P 4 Tab. IV. Naměřené a vypočtené hodnoty ohřevu kaučuků prouděním
- P 5 Tab.V. Naměřené a vypočtené hodnoty použité ke stanovení tepelných koeficientů
- P 6 Tab. VI. Souhrn naměřených a vypočtených hodnot ohřevů kaučuků