

Vliv procesních podmínek na DE ohřev kaučuku, požární rizika

David Pospěch

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: David Pospěch

Osobní číslo: T11320

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: kombinovaná

Téma práce: Vliv procesních podmínek na DE ohřev kaučuku,
požární rizika

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část

- principy dielektrického ohřevu a poznatky z literární studie
- konstrukce dielektrického zařízení
- podmínky provozu dielektrického zařízení

2. Praktická část


- Bezpečnostní podmínky provozu dielektrického zařízení
- Simulace podmínek vzniku hot-spot
- Vyhodnocení experimentu, návrh opatření
- Ekonomické přínosy řešení

3 Závěr

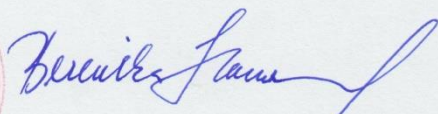
Rozsah bakalářské práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **10. února 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Pospěch David

Obor: TZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 13.5.2014



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je stanovení podmínek mikrovlnného ohřevu s ohledem na bezpečnost provozu. První část je teoretickým souhrnem principů dielektrického ohřevu, konstrukčních prvků DE zařízení, vlastností aplikovaných materiálů pro ohřev a určení bezpečnostních rizik při ohřevu mikrovlnnou technologií se zaměřením na hot spots. Druhá část je zaměřena na laboratorní testy, které odhalují rizikové jevy při DE ohřevu kaučuku a doporučení řešení krizových situací.

Klíčová slova: Dielektrický ohřev, mikrovlny, hot spots, bezpečnost

ABSTRACT

The aim of this work is to determine the conditions of microwave heating with regard to safety. The first part is a summary of the theoretical principles of dielectric heating equipment components DE, properties of materials applied for heating and to determine the security risks during microwave heating technology with a focus on hot spots. The second part focuses on laboratory tests that reveal risk phenomena in DE heating rubber and recommendations crisis situations.

Keywords: The dielectric heating, the microwave, hot spots, the safety.

Touto cestou bych rád poděkoval za nekonečnou podporu při studiu své rodině, zvláště pak mé manželce Elišce.

Mé poděkování patří také panu doc. ing. Zdeňkovi Dvořákovi CSc., za vedení mé Bakalářské práce, za jeho rady a přínosné podněty.

Firmě Smart Plast s.r.o za zapůjčení termovizní kamery.

Poděkovat bych chtěl dále vedení Divize Příprava materiálu Continental Barum s.r.o za poskytnutou příležitost a podporu při seberealizaci.

Dále bych chtěl také poděkovat všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k dokončení mé práce.

Děkuji...

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

OBSAH	8
ÚVOD	10
I. 11	
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 HISTORIE MIKROVLNNÉ TECHNOLOGIE	12
2 SOUČASNÁ VYUŽITÍ DE OHŘEVU-TEORIE	13
3 KONSTRUKCE MIKROVLNNÉHO ZAŘÍZENÍ	19
3.1 PRINCIP MIKROVLNNÉHO OHŘEVU	20
3.2 ČÁSTI ZAŘÍZENÍ	24
4 VHODNÉ MATERIÁLY PRO DE OHŘEV	28
4.1 VŠEOBECNÉ MATERIÁLOVÉ PODMÍNKY	28
4.2 MATERIÁLY V GUMÁRENSKÉM PRŮMYSLU	29
4.2.1 MATERIÁLY - SOLID	30
4.2.2 MATERIÁLY - LIQUID	31
5 NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI DE OHŘEVU	33
5.1 ROZDĚLENÍ NEŽÁDOUCÍCH JEVŮ	33
5.2 HOT-SPOTS	35
6 BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA PROVOZU MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ	37
7 SOUHRN TEORETICKÉ ČÁSTI	40
II. 41	
PRAKTICKÁ ČÁST	41
8 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE	42
9 POSTUP PRÁCE	43
10 PRACOVNÍ PODMÍNKY	44
10.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ	44
11 ZÁTĚŽOVÉ TESTY ZAŘÍZENÍ	51
12 TEST OHŘEVU PŘÍRODNÍHO KAUČUKU	59
12.1 CHOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO KAUČUKU PŘI APLIKACI MIKROVLNNÉ ENERGIE	59
13 TEPLTNÍ VODIVOST – PROSTUP TEPLA	62
13.1 POSTUP MĚŘENÍ A VÝPOČTU TEPLTNÍ VODIVOSTI	62
13.1.1 PŘÍPRAVA, MĚŘENÍ A VÝSLEDKY VÝPOČTŮ TEPLTNÍ VODIVOSTI PK	66
14 DEGRADAČNÍ TESTY	69
14.1 PŘÍPRAVA LABORATORNÍCH PODMÍNEK	69
14.1.1 TEST Č. 1 : PK – SIR 20 CV/BP 1.....	70
14.1.2 TEST Č. 2 : PK – SIR 20 SDE	71
14.1.3 TEST Č. 3 : PK – SMR 10/ MR 9.....	73
14.1.4 TEST Č. 4 : PK – RSS – 3	75
14.1.5 TEST Č. 5 : PK – SIR 20 SED	77
DISKUZE	79

EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	81
ZÁVĚR	82
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	84
SEZNAM OBRÁZKŮ	86
SEZNAM TABULEK.....	88

ÚVOD

Jak je všeobecně známo, gumárenský průmysl patří mezi odvětví s vysokou energetickou náročností. Proto se vždy hledaly a stále hledají nové možnosti, které by přispěly ke snížení spotřeby energie a tím i k nižším provozním nákladům výroby. Stále totiž platí, že cena výrobku patří k jednomu ze stěžejních kritérií při určování konkurenceschopnosti.

Předeřev základní suroviny pro výrobu pryže, což je přírodní a syntetický kaučuk, výrazně snižuje náklady na zpracování. Je to dáno strukturním složením tohoto materiálu. Při vyšších teplotách se snižuje jeho charakteristická houževnatost a stává se tak méně odolným vůči mechanickému zpracování. Z mnoha studií vyplývá, že ohřev pomocí dielektrického zařízení, pracujícího na principu energie mikrovln, je pro tyto účely velmi vhodnou variantou. Výrazně se snižuje potřebný čas ohřevu, energetické nároky a výrazně se zvyšuje kvalita ohřevu. Je to dáno faktem, že mikrovlnný ohřev působí současně i uvnitř ohřívaného materiálu, což u jiných způsobů ohřevu (vedení, sálání) není možné. Díky těmto skutečnostem se v dnešní době využívá DE ohřev v mnoha výrobních odvětvích.

DE technologie má tedy nesporná pozitiva, ale také velké nároky na řízení, konstrukci a technické parametry zařízení. Přináší sebou také jistá negativa, která do jisté míry ovlivňují bezpečný provoz. Při mikrovlnném ohřevu může totiž docházet i k nežádoucím jevům, které mohou způsobit například poškození zpracovávaného materiálu, či dokonce destrukci celého zařízení. Z těchto důvodů je velmi důležité, v podstatě nezbytné, zabývat se bezpečnostními opatřeními, která povedou k bezpečnému provozu takových zařízení.

V první části této práce je vypracovaná teoretická studie zahrnující základní informace o mikrovlnném ohřevu, o konstrukci DE zařízení, vlastnostech ohřívaných materiálů. Dále pak o možných rizicích, nežádoucích jevech a bezpečnostních prvcích. Druhá část práce je popisem laboratorních zkoušek, experimentů vedoucích k odhalení bezpečnostních rizik a stanovení podmínek pro bezpečný provoz.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE MIKROVLNNÉ TECHNOLOGIE

Z historického hlediska byly mikrovlny objeveny na počátku 40. let v Anglii na universitě v Birminghamu. V roce 1947 si všiml zaměstnanec americké firmy Raytheon (výrobce radarů), že se mu v blízkosti radaru roztavila čokoláda. To ho přimělo k myšlence zkonstruovat mikrovlnnou troubu. První patent byl podán v roce 1952. O 9 let později byla vyrobena první mikrovlnná trouba, která byla, ve srovnání s nynější podobou, dosti primitivní. Svými rozměry připomínala velkou skříň. Cena tohoto zařízení začínala na 5000 dolarů za kus. Díky svým vlastnostem začal být mikrovlnný ohřev velmi populární a o rok později byla v New Yorku otevřena první restaurace, která pro přípravu pokrmů, používala právě mikrovlnné zařízení.

Pro běžné domácí využití se mikrovlnné trouby začaly sériově vyrábět až v 80. letech minulého století, kdy Japonsko přišlo s novou technologií výroby magnetronů. [1]

2 SOUČASNÁ VYUŽITÍ DE OHŘEVU-TEORIE

Mikrovlnná technologie se dnes vyskytuje v mnoha výrobních odvětvích. Největšího uplatnění našly mikrovlny v komunikacích (radar, televize, mobilní telefony, satelitní vysílání atd.), dále při ohřevu a zpracování potravin (rozmrazování, pečení, ohřívání) a při sušení různých materiálů (keramika, dřevo, léčiva ap.).

Využití DE (dielektrického) ohřevu je v dnešní době velmi rozšířené také v plastikářském a gumárenském průmyslu. Používá se při přípravě polotovarů a surovin před vlastním zpracováním, ale i jako součást výrobních linek.

V plastikářském průmyslu je DE ohřev využíván převážně k sušení. Princip sušení elektromagnetickou energií je zcela odlišný od konvenčního sušení. Rozdíl spočívá v účinku na materiál. Konvenční způsob působí pouze na povrchu materiálu, zatímco při DE sušení je materiál intenzivně zahříván v celém jeho objemu, tzn. i uvnitř materiálu. Vlhkost tak odchází rovnoměrně z celého sušeného materiálu. Tento způsob navíc zkracuje dobu operace z hodin na minuty, což je především z ekonomického hlediska, velmi zajímavé. Dnes je již samozřejmostí, že plastové polotovary (folie, desky, granule atd.) procházejí před zpracováním (lisování, vytlačování, lepení, atd.) DE zařízením.

DE ohřev se využívá i při polymeraci, což je jedna ze základních operací při výrobě plastů. Slouží tam k homogenizaci teploty výchozí směsi monomerů a dalších přísad. Uplatňuje se při výrobě termoplastů získávaných jednoduchou polymerací, ale i u reaktoplastů, které se vyrábí pomocí polykondenzačních reakcí. Při elektromagnetické polymeraci PMMA, PMA, PS (Polymethylmetakrylát, polymethylakrylát, polystyren) lze dosáhnout podstatného snížení molekulární váhy plastového produktu ve srovnání s konvenčním ohřevem při srovnatelných podmínkách reakce. Úspěšné je využití mikrovln při polymeraci termoplastů nastříknutých v tenké vrstvě na papír při výrobě filtrů pro automobilové motory.

Za reaktoplasty je známá japonská aplikace polymerace epoxidových matic plněných uhlíkem, anebo kevlarom pomocí DE ohřevu v průmyslovém měřítku pro využití v leteckém průmyslu.

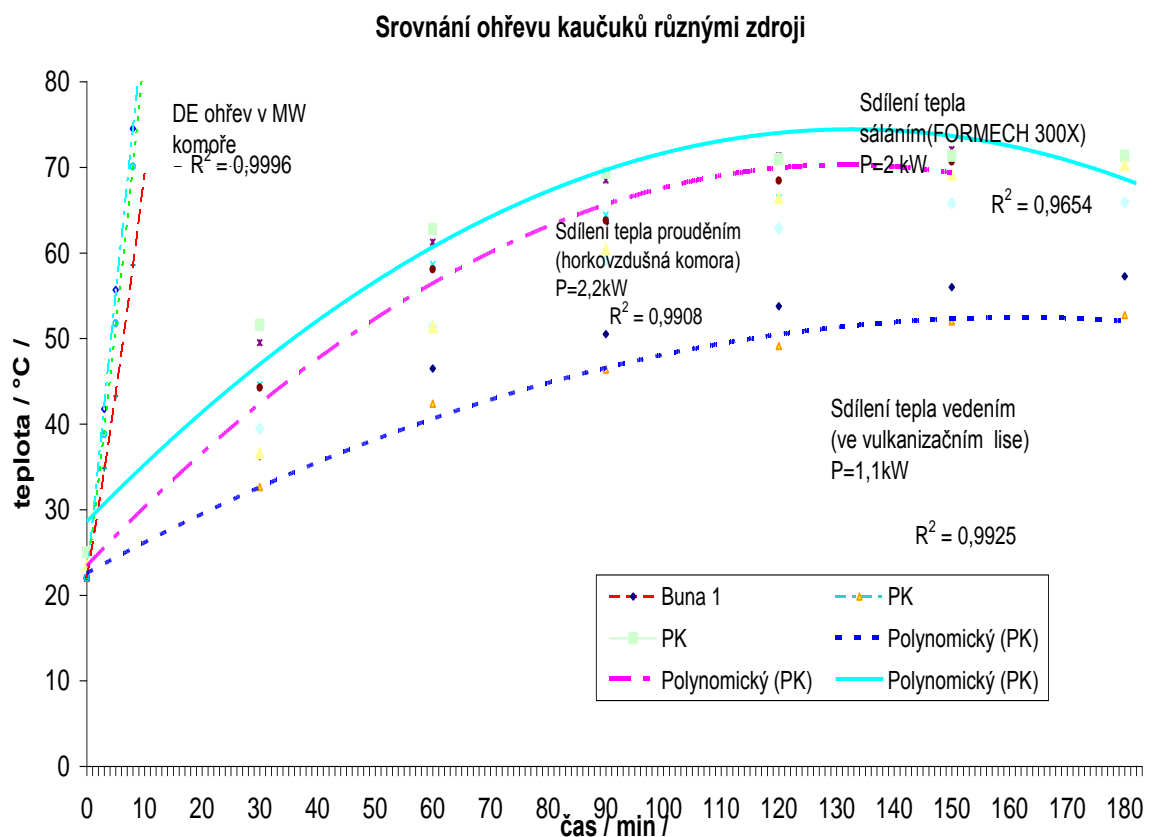
Pro spojování plastů (lepení, svařování) se DE ohřevu využívá také velmi často. V provozech je řada linek s DE ohřevem, které, díky automatizaci řízení, dokážou cyklicky svařovat i složité a hromadně vyráběné produkty. V této oblasti je novinkou svařování pomocí cílené energie mikrovln. Svařování elektromagnetickým vlněním se zvyšuje pevnost vzorků ve

srovnání s lepenými spoji až o trojnásobek. Z tohoto vyplývá, že tato technologie může být vhodnou alternativou. Existují dva způsoby spojování – přímé zahřívání obou vrstev polymerů (i jiných materiálů), anebo pomocí tzv. suscepční mezivrstvy, která po aplikaci DE spojí obě vrstvy k sobě.

Při technologii tvarování plastů je nutné, aby materiál měl stejnou (tvarovací) teplotu ve všech místech. Toto se dá konvenčními způsoby ohřevu zajistit jen stěží, a proto se také hojně využívá DE ohřev, který navíc zajistí časovou, ale i energetickou úsporu. Obvyklé tloušťky tvarovaných plastů do 6 mm lze zpracovávat během několika sekund.

DE technologie se s úspěchem využívá i při recyklaci plastů. Je ověřena aplikace, při níž se z hořlavého plastového materiálu s použitím DE ohřevu vyrábí nový materiál se zvýšenou ohnivzdorností, použitelný například k tepelné izolaci. Elektromagnetickým vlněním se likvidují i nebezpečné odpady, obsahující vysoký podíl plastů, například ze zdravotnických zařízení. Dosahuje se spolehlivé neutralizace na úroveň komunálního odpadu. [2]

V gumárenském průmyslu se mikrovlny využívají hlavně k přípravným operacím. Jedná se především o předehřev používaných surovin. Například přírodní kaučuk se vyznačuje vysokou houževnatostí, která má za následek obrovskou spotřebu energie při následném zpracování. Při využití DE předehřevu se tato houževnatost výrazně sníží a tím se v konečném důsledku sníží procesní náklady o desítky procent. Také zde platí, že při zařazení DE ohřevu do přípravných aplikací, dochází ke značné úspoře času, potřebného k dostatečnému prohřátí zpracovávaných materiálů. Při ohřevu kaučukových směsí před mícháním do jednotlivých míchacích stupňů lze také zkrátit míchací čas a snížit náročnost na energii.



Obr1 Porovnání efektivnosti použitých typů ohřevu na různých druzích kaučuku [3]

V gumárenství je možné také použít DE ohřev k samotné vulkanizaci, či její přípravě gumárenských výrobků a to zejména u výrobků, které se nevulkanizují v uzavřených lisech. Jedná se o náhradu vulkanizačních kotlů, pecí atd. Při vulkanizaci v lisech je možné pouze předeřhát polotovar, čímž se podstatně zkrátí vlastní vulkanizace (zvýší se produktivita vulkanizačních strojů).

V moderních podnicích jsou zastoupeny mikrovlnná zařízení o vysokých výkonech, schopná připravit najednou velké množství materiálu. Procesní kapacita je ovlivněna především velikostí instalovaného elektromagnetického výkonu, vlastnostmi ohřívajícího materiálu, jeho počátečním stavem. Výkon zařízení by měl přibližně odpovídat následujícímu vzorci: 1kW na cca 30 kg materiálu /hodina.



Obr. 2 Mikrovlnná komora Continental Barum s.r.o. Otrokovice



Obr. 3 Mikrovlnná komora Continental Barum s.r.o. Otrokovice



Obr. 4 Mikrovlnná komora Continental Barum s.r.o. Otrokovice

Využití mikrovln ve sklářství (mikrovlnná technologie tavení skla) Aplikovaný výzkum v oblasti sklářství byl zahájen na popud severočeských uměleckých sklářů, kteří se zabývali konstrukcí jednoduché sklářské pece pro sklářská studia. Bohužel klasické pece vyhřívané plynem či elektřinou nespĺňovaly požadavky na rychlost a hospodárnost tavení. O mikrovlnách je všeobecně známo, že mikrovlnný ohřev je rychlý a energeticky úsporný. Ohřívá pouze materiál vložený do mikrovlnného pole a nikoliv prostor nebo těleso pece. Problémem však byla skutečnost, že sklo mikrovlny neabsorbuje, tedy se neohřívá, natož taví. Tento problém se však podařilo úspěšně a přitom jednoduše vyřešit zkoncentrováním mikrovlnné energie do jednoho místa, kde dojde k lokálnímu natavení, které se rychle rozšíří do celého objemu. Horké sklo již mikrovlny absorbuje a není problém dosáhnout požadovaných vysokých teplot (až 1500 °C). [5]



Obr. 5 Mikrovlnná sklářská pec

Za nejdůležitější výsledek mikrovlnné tavící technologie lze kromě zmíněné rychlosti či hospodárnosti považovat příznivý vliv mikrovln na kvalitu skla (vyšší brilance, potlačení vzniku šlír, rovnoměrné zbarvení skla pro technické i umělecké účely). Tyto výsledky, které se začaly ověřovat i v zahraničí, mohou významně ovlivnit sklářský průmysl v blízké budoucnosti. Obdobná technologie byla vypracována pro tavení čediče na vlákna za účelem výroby žáruvzdorných textilií a výrobků nahrazujících azbest. [5]

3 KONSTRUKCE MIKROVLNNÉHO ZAŘÍZENÍ

Většina mikrovlnných zařízení používaných v praxi se od sebe obecně příliš neliší. Jejich skladba je vždy stejná, skládá se z daného počtu magnetronů. Jejich výstupy elektromagnetického generátoru - magnetronu jsou spojeny vlnovody patřičné konstrukce a sbíhají se v komoře. K vlnovodům se můžou vázat zařízení pro rozptyl záření mající vliv na následné rozložení elektromagnetického pole v komoře. Obecně tedy můžeme shrnout jednotlivé strojní komponenty či funkční celky mikrovlnných zařízení do tohoto výčtu:

- magnetron,
- napájecí zdroj pro magnetron,
- vlnovody,
- komora se systémem otvírání a ochrany nežádoucího otevření,
- přídavné stínící prvky,
- dopravníky materiálu,
- pomocné elektromotory (posun materiálu, rozptylové zařízení,...),
- pomocné zdroje napětí,
- topná tělesa pro sálavé teplo,
- přídavný zdroj horkého vzduchu,
- elektronika časového spínače a řízení výkonu [8]

Existují 2 základní druhy mikrovlnných zařízení, buď s **rozptýleným polem**, nebo s **fokusem polem**.

S rozptýleným polem (multimode)

- Kuchyňská trouba – úprava pro pokusy
- Laboratorní zařízení MILESTONE, (Itálie)
- Laboratorní zařízení PLAZMATRONIKA, (Polsko)

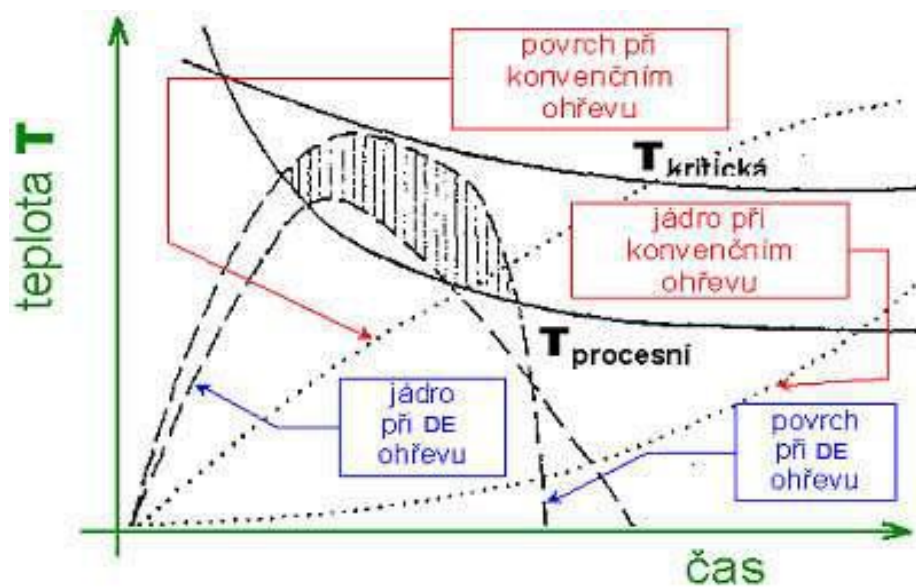
S fokusovaným polem (monomode)

- PowerMax (CEM, USA)

Většinou se používají jak v laboratoři, tak v průmyslovém měřítku zařízení s rozptýleným polem. Fokusované pole je výhodnější pro výzkum v malém měřítku (vzorek se umísťuje do vlnovodu). [5]

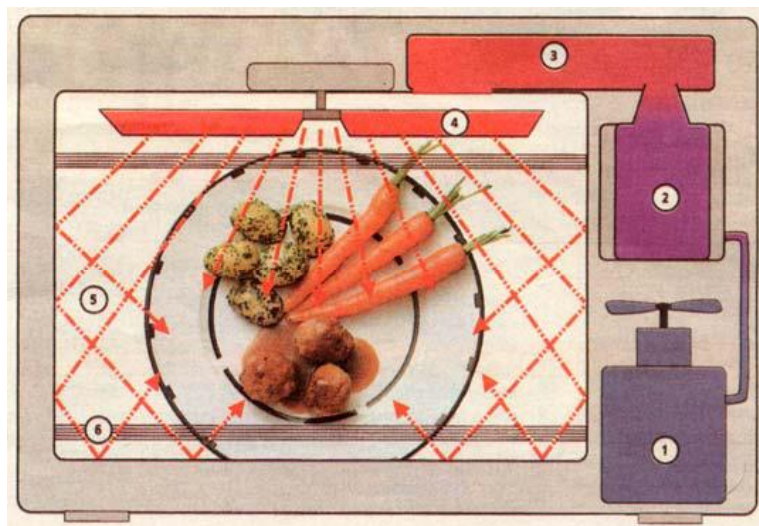
3.1 Princip mikrovlnného ohřevu

Mikrovlny vznikají přeměnou elektrické energie na energii elektromagnetického vlnění v generátoru, který se nazývá magnetron. Tato energie se dále mění na energii tepelnou působením na polární molekuly materiálu. Materiál se ohřívá v celém objemu. Ze všech druhů ohřevu lze pouze dielektrickým ohřevem (tj. ohřevem na vysokých kmitočtech včetně mikrovln) vyvolat vyšší teplotu uvnitř produktu než na povrchu (Obr. 6).



Obr. 6 Porovnání DE a konvenčního ohřevu

Mikrovlny jsou generovány magnetronem 2 a poté se vedou vlnovodem 3 do prostoru trouby (kavity) 5. Tam se mikrovlny rozptýlí 4, odrážejí se od stěn a vytvářejí zde mikrovlnné pole; 5,6. (Obr. 7).

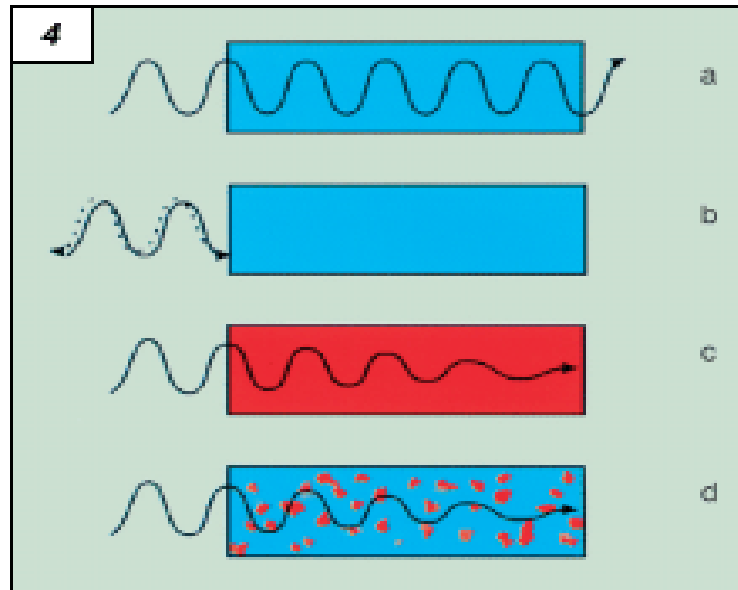


Obr. 7 Schéma mikrovlnné trouby: 1 vysokofrekvenční zdroj; 2 magnetron; 3 vlnovod; 4 rozptylovač mikrovln; 5,6 varny prostor

Mikrovlny se spotřebovávají pohlcením v absorpčních materiálech při vzniku tepla. Pokud se v mikrovlnném poli vyskytuje materiál s nízkou nebo žádnou absorpční schopností, mikrovlny se nemají kde pohltit, dochází k jejich zpětnému odrazu do magnetronu, což snižuje jeho životnost, případně hrozí jeho zničení. To je důvod, proč se nesmí mikrovlnné zařízení spouštět bez ohřívání materiálu. Účinnost magnetronů při přeměně elektrické energie na mikrovlnnou je max. 65-70 %. Většina ztrát připadá na uvolněné teplo v magnetronu, který se proto musí intensivně chladit. Při úpravě kuchyňské mikrovlnné trouby pro laboratorní použití (vyvrtání děr např. pro chladič či teploměr), je třeba pravidelně kontrolovat detektorem mikrovln, zdali nedochází k úniku mikrovln do prostoru obsluhy. [2]

Jak vzniká mikrovlnný ohřev (tj. jak se přeměňuje mikrovlnná energie na teplo)? Z hlediska materiálu a jeho interakce s mikrovlnami existují 4 možnosti:

- a) Transparentní (např. sklo, nepolární látky)
- b) Absorpční (např. voda, polární rozpouštědla)
- c) Odrážející (např. kovy)
- d) Kombinace materiálů



Obr. 8 Působení elektromagnetického vlnění na různé druhy materiálů: a- vlny projdou (sklo, keramika, papír), b-odrazí se (kovy), c-absorbují se (voda), d- smíšený materiál.

Z obecného pohledu nás zajímá především případ b, tj. interakce mikrovln s látkami, které mikrovlny absorbují, např. látky polární. V normálním stavu jsou polární molekuly v neuspořádaném stavu. V elektrickém poli dojde k orientaci molekul podle polarity (kladná část k zápornému pólu, záporná ke kladnému pólu). Co se však stane s polární molekulou při vystavení elektromagnetickému, tj. mikrovlnnému poli? Polarita vysokofrekvenčního elektromagnetického pole se mění více než 10^9 krát za sekundu. Polární molekula je nucena se těmto rychlým změnám přizpůsobit, ale sotva se přizpůsobí, již se polarita opět změní. To vyvolá oscilační vibrace, kdy dochází ke tření a srážkám molekul (a k dielektrické ztrátě). To se projeví jako teplo, to znamená: dojde k přeměně mikrovlnné energie na energii tepelnou. [2]

Mechanismus přeměny mikrovlnné energie na teplo je dán vztahem:

$$P = 2\pi f \varepsilon' \varepsilon'' E^2 V \quad (1)$$

Kde:

P - energie absorbovaná v jednotce objemu (W/m^3),

f - frekvence mikrovlnného pole (2450 MHz),

ϵ' - permitivita vakua, ($8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$),

ϵ'' - imaginární část komplexní relativní permitivity,

E - intenzita elektrického pole uvnitř materiálu (V/m),

V – objem materiálu (m^3)

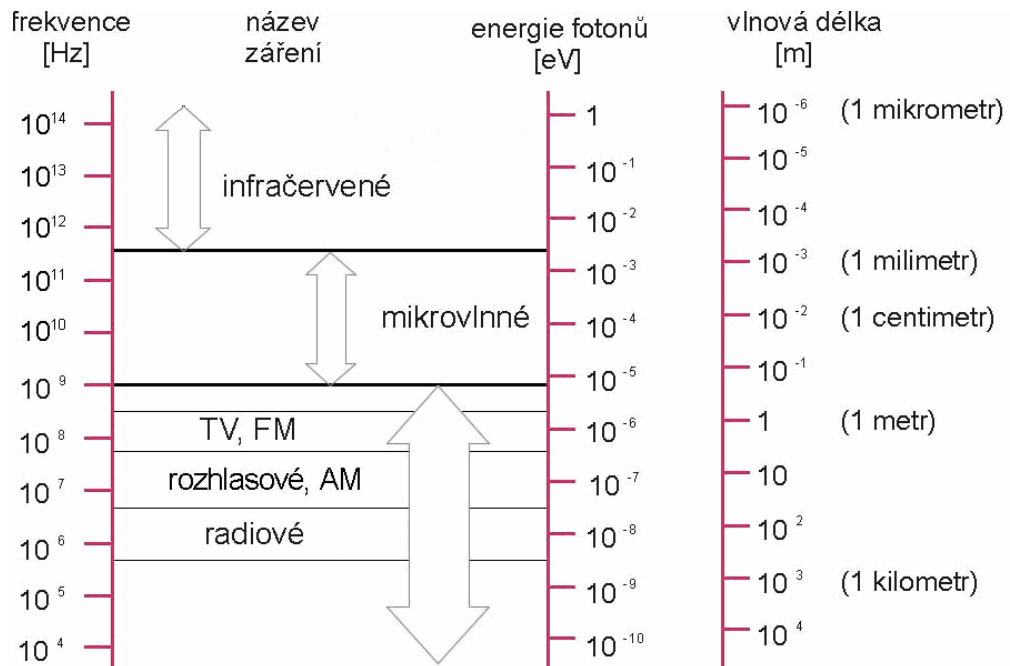
[4]

Mikrovlny zaujímají širokou škálu frekvenci od 300 MHz do 300 GHz (Obr. 9), což odpovídá vlnové délce mezi 1 metrem a 1 milimetrem.

Většina frekvencí v tomto intervalu se používá ke komunikačním účelům (rozhlasové a televizní vysílání, spojovací zařízení pro telefony, internet aj.), proto aby se zabránilo vzájemnému rušení, byly pro mikrovlnný ohřev určeny dané frekvence: všechny průmyslové aplikace jsou prováděny při 915 MHz v USA, 896 MHz v UK a 2450 MHz celosvětově. Veškeré komerční a spotřebitelské mikrovlnné trouby operují při 2450 MHz, což odpovídá délce vlny 12,2 cm.

Důvody používání těchto frekvenci jsou:

- dostupnost mikrovlnných generátorů v těchto frekvencích, v užitečném výkonu a v rozumné ceně
- vlnová délka v těchto frekvencích se shoduje s vlnovou délkou oscilace vody, což má za následek účinnější teplo, než by bylo získáno při vyšších nebo nižších frekvencích



Obr. 9 Oblasti spektra elektromagnetického záření

3.2 Části zařízení

Zdroje elektromagnetického pole

Jednotlivé mikrovlnné elektronky popisované v dalším textu se liší jak svojí konstrukční geometrií, tak i principem činnosti, ale přesto mají několik společných vlastností:

- všechny elektronky využívají pro svoji činnost interakci mezi svazkem elektronů a vysoko frekvenčním elektromagnetickým polem ve vakuu uvnitř skleněného nebo kovového pláště,
- výstup vysokofrekvenční energie zpravidla umožňuje koaxiální sonda nebo smyčka, resp. rezonanční okno, rozžhavená katoda emituje elektrony. Tyto katody se zpravidla konstruují z kovu, na jehož povrchu je wolfram nebo oxid baria.
- proud elektronů je fokusován do úzkého svazku anodou s vysokým napětím. Alternativně se pro fokusaci elektronů používá selenoidální elektromagnet.

- pro pulzní provoz se používá elektroda k modulaci svazku elektronů (kladné předpětí elektrony urychluje, záporné předpětí je zpomaluje).

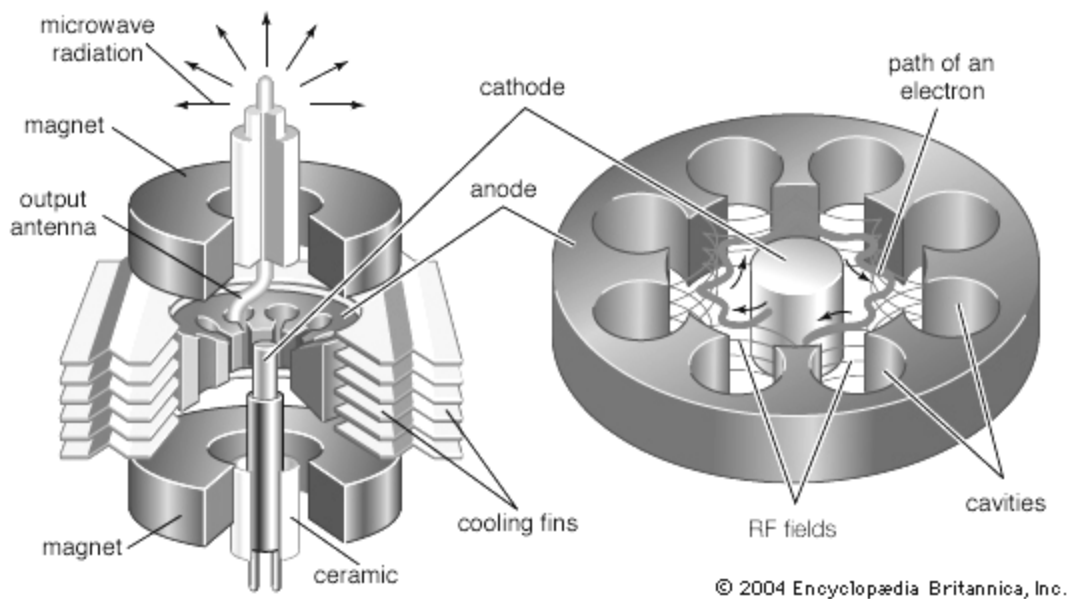
Mikrovlnné elektronky můžeme podle typu interakce elektronového svazku s elektromagnetickým polem rozdělit do dvou skupin:

- elektronky s lineárním svazkem (proud elektronů prochází elektronkou a je rovnoběžný s orientací elektromagnetického pole),
- elektronky s příčným polem (fokusující pole je kolmé k urychlujícímu elektrickému poli). [7]

Magnetron

Základ magnetronu (Obr. 10) tvoří velmi silný permanentní magnet ve tvaru prstence. Tímto magnetickým prstencem je obklopena vakuová trubice s rezonančními komorami, uvnitř každé je z jedné strany žhavicí katoda a z druhé vlnovod, který přenáší mikrovlnné záření do požadovaného směru. Hlavní části magnetronu tvoří:

- silný prstencový permanentní magnet,
- vakuová trubice s elektrodou (katoda),
- keramická zátka, oddělující vlnovod a vakuum,
- anodový blok (anoda),
- vlnovod,
- chlazení (vzduchem/kapalinou),
- kondenzátor.



Obr. 10 Konstrukce magnetronu

Na katodu je přiváděno žhavicí napětí řádově několik voltů (3V), zatímco na anodu magnetronu napětí v řádu kilovoltů (3200 V). Dalšími důležitými součástkami, bez kterých by magnetron nebyl schopen funkce, jsou vysokonapěťová dioda, vysokonapěťový transformátor a vysokonapěťový kondenzátor. Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou přitahovány směrem k anodě, ale silné magnetické pole mění jejich dráhu na kruhovou. Proud elektronů indukuje v rezonačních komorách vysokofrekvenční kmitů, které jsou odváděny vlnovodem. [2]

Magnetron dosahuje poměrně velké účinnosti (kolem 65%), frekvence generovaných kmitů však není příliš přesná. Pro generování vysokofrekvenčních kmitů s přesnou frekvencí se používá klystron, jehož účinnost je však asi poloviční.



Obr. 11 Magnetron značky LG o výkonu 1,1 kW a frekvenci 2,45 GHz.

Klystron

Klystron je elektronka s lineárním svazkem. Bývá využíván jako oscilátor i jako zesilovač. Podle toho se liší konstrukce jeho variant. Má jednu, dvě, nebo i více rezonančních dutin. V případě jedné rezonanční dutiny hovoříme o reflexním klystronu, který se využívá pro generování mikrovlnného signálu. Tato rezonanční dutina má kladné předpětí, za ní je umístěn tzv. reflektor (elektroda se záporným předpětím). Tím vzniká kladná zpětná vazba, tím pádem i oscilace. Klystrony lze seřizovat mechanicky změnou rozměru rezonanční dutiny. [8]

Vlnovody

Z obecného hlediska je vlnovod vedením, jehož příčný rozměr je srovnatelný s délkou vlny, a tudíž hraje roli při přenosu elektromagnetické energie. Z hlediska materiálu, z něhož jsou vlnovody vyrobeny, je můžeme rozdělit na dielektrické a kovové.

V dielektrickém vlnovodu se vlna šíří odrazy od stěn. Aby nedocházelo k "úniku energie" z vlnovodu tím, že by se vlna rozdělila na odraženou a procházející, musí nastávat na rozhraní vlnovod - okolí totální odraz.

Totální odraz nastane jen tehdy, je-li permitivita vlnovodu ϵ_v vyšší nežli permitivita okolí ϵ_o . Čím vyšší bude permitivita dielektrika vlnovodu ϵ_v ve srovnání s permitivitou okolí ϵ_o , tím menší bude kritický úhel a tím kolměji může vlna dopadat na stěnu vlnovodu, aniž by docházelo k lomu. Úhel dopadu na stěnu vlnovodu závisí na vlnové délce šířící se vlny a příčných rozměrech vlnovodu.

Kovové vlnovody jsou kovové trubice libovolného průřezu. Nejčastěji se používají trubice s průřezem obdélníkovým nebo kruhovým. Ve speciálních případech může mít průřez kovových vlnovodů tvar písmene Π nebo H , tyto vlnovody jsou širokopásmovější než běžný obdélníkový vlnovod, avšak na druhou stranu přenášejí menší výkon. [9]

4 VHODNÉ MATERIÁLY PRO DE OHŘEV

Materiály vhodné pro DE ohřev se nazývají dielektrika.

Dielektrika jsou izolanty, které mají schopnost polarizace. Přestože dielektrikum neobsahuje žádné volné elektrické náboje a jeví se navenek jako neutrální, je složeno z velkého množství elementárních částic, které elektrický náboj obsahují (např. atomy, funkční skupiny, ionty apod.). Vnější elektrické pole, které působí na elementární částice v dielektriku, ovlivňuje rozložení elektrického náboje v dielektriku. Změněné rozložení nábojů pak zpětně ovlivňuje působící pole. Vložení dielektrika do elektrického pole nastává jev, který se nazývá polarizace dielektrika [8].

4.1 Všeobecné materiálové podmínky

Mikrovlny se můžou šířit v různých médiích, samozřejmě s nižší rychlostí než ve vakuu. Ve vzduchu je tento rozdíl malý, jiná je situace ve vodě, kde se mikrovlny šíří 9 krát nižší rychlostí, a v důsledku toho se i vlnová délka devětkrát zkrátí na 1,36 cm. Při přechodu mikrovln z jednoho prostředí do druhého dochází na rozhraní k odrazovým a lomovým jevům stejně jako u světla a platí pro ně stejné zákony. V podstatě jde o kombinaci tří případů - mikrovlny se odrazí, absorbují nebo projdou (obr. 8). Při absorpci mikrovln v materiálu se snižuje amplituda vlny. Míra absorpce je charakterizována pomocí penetrační hloubky, což je vzdálenost, kterou mikrovlnné záření v materiálu musí projít, aby jeho intenzita klesla na 13,53 % původní hodnoty. Jak vyplývá z Tab. 1 u kovových materiálů, které jsou dobře vodivé, se penetrační hloubka pohybuje řádově v mm a mikrovlny se z jejich povrchu odrážejí, zatímco led a obecně nevodiče jsou pro mikrovlny transparentní. U ostatních materiálů závisí penetrační hloubka na jejich dielektrických vlastnostech, charakterizovaných relativní permitivitou. K zajímavému jevu dochází při dopadu mikrovln na zakřivené rozhraní vzduch - voda, které je schopné fokusovat mikrovlny. Je to důsledek vysokého indexu lomu, kdy se mikrovlny po vstupu do vodného prostředí lámou ke kolmici. Výsledkem jsou problémy s ohřevem vodných objektů tvaru koule (vajička, rajčata, brambory), u kterých dochází k přehřátí středu objektu a jeho následné explozi. [6]

Látka	Teplota (°C)	Penetrační hloubka (cm)	Látka	Teplota (°C)	Penetrační hloubka (cm)
Voda	1.5	1.7	Voda	25	3.4
Voda	45	5.4	Voda	65	7.6
Voda	95	14	Roztok NaCl	25	2
Led	-12	3000	Měď	25	0,000013
Hliník	25	0,000017	Teflon	20	9000
Tuk	37	6	Metanol	25	1,5
Etanol	25	7	n-Butanol	25	5
Etylenglykol	25	1,3	Nylon	20	300

Tab. 1 - Penetrační hloubka mikrovln v různých materiálech [6]

Vtáh pro výpočet penetrační hloubky

$$PD = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right) \cdot \sqrt{\frac{e'}{e''}} \quad (2)$$

Kde:

PD - Penetrační hloubka

λ_0 - vlnová délka ve vakuu

e' - reálná část komplexní relativní permitivity

e'' - imaginární část komplexní relativní permitivity

4.2 Materiály v gumárenském průmyslu

V gumárenském průmyslu se zpracovává opravdu velké množství nejrůznějších materiálů pro výrobu kaučukových směsí. Ne vždy jsou však potřebné suroviny dodávány v ideálním stavu (připraveny k okamžitému zpracování). Jejich další příprava je logicky odvozena použitými technologiemi zpracování a také použitým strojním zařízením. Některé z nich je třeba předeřhřát na zpracovatelskou teplotu. V následujících kapitolách se podíváme na ty

gumárenské materiály, u kterých lze s úspěchem uplatnit mikrovlnnou technologii při jejich přípravě ke zpracování.

4.2.1 Materiály - Solid

Materiály solid – materiály v pevném skupenství se v gumárenském průmyslu vyskytují v největší míře. Jsou zde obsaženy veškeré suroviny pro výrobu kaučukové směsi, ze které se poté vyrábí požadované produkty. Jedná se o veškeré kaučuky, ať už přírodní či syntetické (mimo syntetických liquid kaučuků viz kapitola 4.2.2). Materiálů pro výrobu kaučukových směsí je velké množství.

Patří sem:

- Elastomery - Přírodní kaučuk
- Syntetický kaučuk
- Plniva - Aktivní
- Neaktivní
- Změkčovadla
- Aktivátory
- Stabilizátory
- Vulkanizační činidla
- Urychlovače vulkanizace
- Pomocné gumárenské přísady - Plastikační činidla, nadouvadla, pigmenty, adhezivní činidla, atd.

Z hlediska aplikace mikrovlnné technologie je relevantní přírodní, syntetický kaučuk a hotové kaučukové směsi. Ostatní komponenty jsou ve směsi obsaženy podle DSK (dílů na 100 dílů kaučuku), a to v relativně malém množství. Takové materiály není třeba předehtvat. Vzhledem k jejich převážně sypké konzistenci, by byl takový ohřev neekonomický. Přírodní kaučuk je do gumárenských provozů standardně dodáván v blocích o hmotnosti cca 35 kg, které jsou na paletách po 30 – 36 ks. Syntetický kaučuk se dodává také v blocích, avšak v menších hmotnostech (cca 25 kg). Dielektricky se ohřívají oba typy, a to po celých paletách (i několik najednou, dle kapacity mikrovlnného zařízení). DE ohřev hoto-

vých polotovarů (kaučukové směsi) není prozatím zcela běžný způsob. Při odpovídající logistice a instalaci vhodného typu mikrovlnného zařízení, by bylo možné kontinuálně ohřívat kaučukové směsi před dalším zpracováním, například před mícháním do dalšího míchacího stupně. Zvýšená teplota vstupního materiálu, by se pozitivně odrazila na výrobním čase, potažmo na produktivitě a celkové ceně výroby.

4.2.2 Materiály - Liquid

Do této skupiny gumárenských materiálů patří používané komponenty v kapalném skupenství. Jedná se o nejrůznější látky, jako jsou oleje, aktivátory, pryskyřice, či syntetické liquid kaučuky. Tyto materiály mají různou hustotu. Pro jejich lepší dávkování se musí emperovat, čímž se výrazně sníží jejich viskozita a usnadní se tak i aplikace do míchaných kaučukových směsí. Dávkuje se pomocí vysokotlakých čerpadel přes speciální injektory. Rychlost dávkování musí být co největší, pro představu: cca 1litr / sekundu. V současné době se tyto suroviny ohřívají konvenčním způsobem v zásobnících s instalovanými topnými tělesy. Aplikací DE ohřevu se snižují náklady na přípravu těchto materiálů před zpracováním. Pracuje se na projektech, které tuto technologii budou využívat při přípravě liquid komponentů kaučukových směsí.



Obr. 12 Konvenční způsob ohřevu liquid materiálů – vyhřívací komora

5 NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI DE OHŘEVU

Jak již bylo zmíněno v dřívějších kapitolách, mikrovlnný ohřev je založen na působení elektromagnetického pole na póly molekul ohřivaného materiálu. Je to proces, při kterém se elektrická energie přeměňuje energii tepelnou. Výhodou mikrovlnné technologie, na rozdíl od konvenčních druhů ohřevu, je působení v celém objemu ohřivaného materiálu.

Kromě těchto pozitivních vlastností, sebou DE ohřev přináší i několik negativ - nežádoucích jevů, které při aplikaci mohou nastat. Všeobecnou snahou je těmto jevům předcházet a eliminovat tak vzniku potencionálních škod. Tyto škody mohou být jak na zpracovatelském zařízení, tak na zpracovávaném materiálu. Nezřídka může dojít i k ohrožení zdraví a životů obslužných pracovníků. Z těchto důvodů je nezbytné, při využívání technologie mikrovlnného záření, odhalovat a analyzovat veškeré nežádoucí jevy, které při provozu nastávají.

5.1 Rozdělení nežádoucích jevů

Mikrovlnný ohřev má některé vlastnosti, které neexistují u klasického ohřevu. Projevují se jako mikrovlnné efekty, což jsou takové efekty, které nelze dosáhnout klasickým ohřevem. Existují dva druhy mikrovlnných jevů:

- teplotní
- neteplotní

Teplotní jevy

teplotní efekty jsou vyvolány přeměnou mikrovlnné energie na teplo.

Rozeznáváme následující druhy teplotních efektů:

- přehřátí
- horké a studené zóny (tzv. hot spots)
- objemový ohřev
- selektivní ohřev
- teplotní úlet
- simultánní chlazení (při mikrovlnném ohřevu)
- ostatní efekty (i zábavného charakteru, např. jiskření tužky, vypalování CD, rozsvícení výbojky a další)

Přehřátí - může být celkové či lokální. Například polární rozpouštědla (aceton, propanol) vřou za atmosférického tlaku až o 30 až 50 °C nad bodem varu neboť dodaná mikrovlnná energie je mnohem vyšší, než odebraná energie reprezentovaná výparným teplem. Nejčastěji k přehřátí dochází v důsledku nehomogenity mikrovlnného pole. Mikrovlnné pole rozptýlené v prostoru trouby není nikdy zcela homogenní, tj. existují místa s vyšší a nižší intenzitou, tzv. "hot spots", která mohou způsobit až místní přepálení zejména tuhých materiálů. V kuchyňských mikrovlnných troubách se tento jev potlačuje rotačním talířem, u průmyslových zařízení běžícím pásem, nebo oscilačními pohyby dopravníku materiálu.

Objemový ohřev - k ohřevu materiálu dochází v celém objemu, tj. zevnitř k povrchu a nikoliv přestupem tepla od povrchu dovnitř, jak je tomu u klasického ohřevu. To může přispívat k rovnoměrnosti ohřevu, avšak záleží na tvaru, velikosti a složení materiálu. Teplotní profil je opačný než u ohřevu klasického. Nejvyšší teplota je uvnitř a klesá směrem k povrchu. Vzhledem k objemovému ohřevu je mikrovlnný ohřev několika násobně rychlejší než ohřev klasicky a nezávisí na tepelné vodivosti materiálu. To znamená, že materiály s nízkou tepelnou vodivostí lze velmi rychle ohřát v celém objemu, což klasickým ohřevem není možné.

Selektivní ohřev – k ohřevu u vícesložkového materiálu dochází jen u složky, která absorbuje mikrovlny. Neabsorbující složka se neohřívá nebo jen vedením od ohřáté složky (např. směsi voda-tuk, voda-olej, voda-chlorid uhličitý atp.). V těchto případech se ohřívá jen voda. To má dalekosáhlý význam pro provádění chemických reakcí a v dalších procesech (sušení, katalýza).

Teplotní úlet – dochází k němu jen ve výjimečných případech, kdy schopnost absorpce mikrovln prudce stoupá s teplotou (např. u práškových kovů, či oxidů). U vody tento případ nehrozí, neboť absorpce mikrovln vodou s teplotou naopak klesá. Může však dojít k přehřátí vody nad 100 °C. [5]

Neteplotní jevy

Neteplotní efekty jsou efekty vyvolané přímým účinkem mikrovlnné energie na chemickou vazbu, tj. které se nedají vysvětlit žádným z výše uvedených teplotních efektů. Jejich existence však nebyla dosud vědecky plně prokázána. [5]

5.2 Hot-spots

Horké a studené zóny jsou vytvořeny nelineárními závislostmi tepelných a elektromagnetických vlastností zahřívaných materiálů na teplotě. O nerovnoměrném zahřívání hovoříme v případě, pokud se rychlost, při které je mikrovlnná energie absorbována materiálem, zvýší rychleji, než lineárně s teplotou. Místa s velmi vysokou teplotou pak mohou vytvořit horké zóny. K vytvoření horkých zón významně přispívá nerovnoměrnost elektromagnetického pole. Obecně mohou být horká místa vytvořena jak místním přehřátím, selektivním ohřevem tak nerovnoměrností elektromagnetického pole. Z hlediska velikosti můžeme horké zóny rozdělit na:

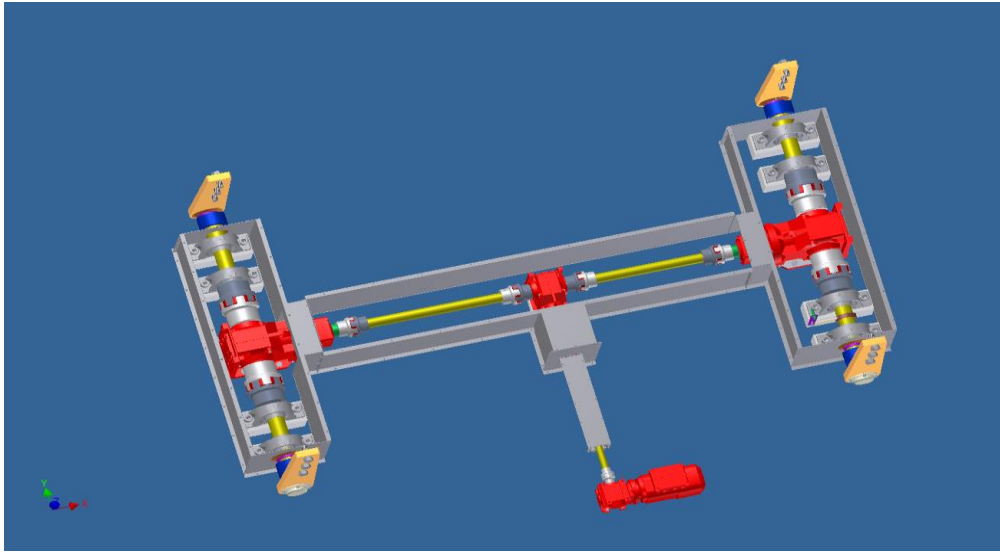
- Makroskopické horké zóny, které můžeme detekovat a změřit optickým pyrometrem, optickými vlákny nebo IR pyrometrem;
- Mikroskopické horké zóny, které nemůžeme výše uvedenými metodami detekovat ani změřit, protože jsou příliš malé.

U heterogenních systémů závisí kinetika MW ohřevu na konkrétním složení daného heterogenního systému. Především se zde uplatňuje efekt selektivního ohřevu. Velmi důležitá je také vzájemná kombinace skupenství a polarit jednotlivých složek heterogenní směsi. Ke vzniku tzv. horkých a studených zón může docházet jak při ohřevu heterogenních, tak i homogenních systémů, viz Obr. 14. [10]

V praxi se horkým a studeným zónám předchází různými způsoby.

V zařízeních určených pro domácí využití (mikrovlnné trouby) se používá otočný talíř, který během ohřevu rotuje a tím zajišťuje homogenitu elektromagnetického pole uvnitř zařízení. Mikrovlny se neabsorbují stejnoměrně, nýbrž (díky rotaci zátěže) vnikají do ohřívajícího materiálu vždy v jiném místě.

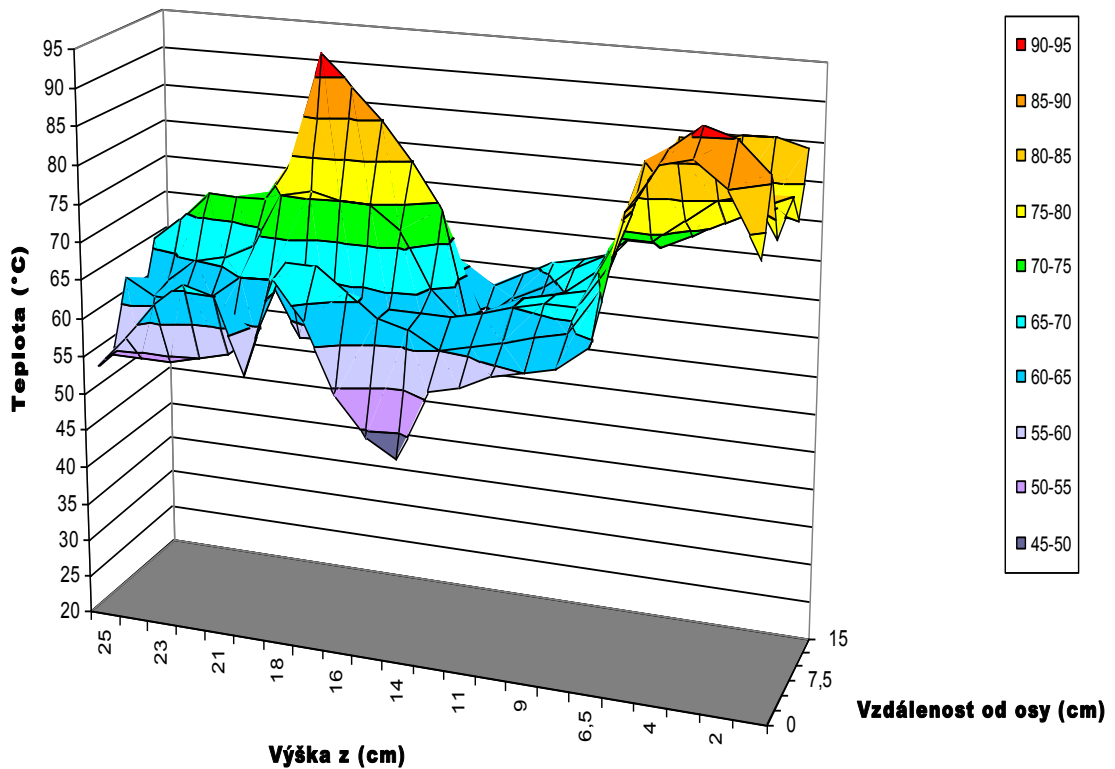
V průmyslových mikrovlnných zařízeních se uplatňují různé druhy posuvných, pohyblivých dopravníků, které mají zajistit homogenizaci elektromagnetického pole. Pro zajištění rovnoměrnějšího ohřevu se používá speciální mechanismus spojený s dopravníkem. Mechanismus sestává ze čtyř klikových hřídelí současně se otáčejících, na kterých je uložen dopravník. Dopravník vykonává krouživý pohyb ve svíslé rovině na dráze o průměru 100 mm. Jednotlivé klikové hřídele jsou propojeny soustavou tří kuželových převodovek s pohonem jednou šnekovou převodovkou, viz Obr. 13.



Obr. 13 Konstrukce klikového mechanismu pro pohyb dopravníku v mikrovlnném poli.

Mikrovlnný ohřev 2 bloků kaučuku: BROMBUTYL (BIIR)

Generátor MW-A-5kW, $P_g=5,0$ kW, $P_r=0,2$ kW, $m_1+m_2=22,1$ kg, $t_0=21$ °C, doba MW ohřevu 10 minut.



Obr. 14 Průběh vzniku „hot spots“ při DE ohřevu syntetického kaučuku

6 BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA PROVOZU MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ

Mikrovlnná zařízení se využívají jak v domácnostech, tak i v průmyslové sféře již řadu let. Otázka bezpečnosti provozu těchto zařízení je řešena již od samého objevení mikrovlnného záření v roce 1947. Pro spotřebitelský trh se mikrovlnná zařízení (mikrovlnné trouby pro úpravu potravin) dodávají již od 80. let minulého století. Účinky mikrovlnného působení na lidský organismus nejsou nikterak závažné při krátké expozici. Přesto je třeba se před nimi chránit. Domácí mikrovlnná zařízení jsou proti úniku mikrovln do okolí zajištěna tzv. filtrem mikrovln na dvířkách zařízení. Jedná se o „síto“, které je schopno (vzhledem k rozměru vlnové délky) mikrovlny bezpečně udržet uvnitř. Dalším bezpečnostním prvkem je znemožnění startu funkce magnetronu, dokud není zařízení uzavřeno. Při zabraňování úniku mikrovlnného záření u průmyslových zařízení se využívá odrazu vln. Znamená to, že uzavírací dveře jsou ze stejného materiálu jako povrch vnitřní komory.



Obr. 15 Mikrovlnná komora Continental Barum s.r.o. - následky požáru.

I při zajištění těchto podmínek však není zdaleka vyhráno. Při provozu mikrovlnných zařízení se vyskytují další bezpečnostní rizika, která mohou vést k poškození upravovaného materiálu, či dokonce k destrukci celého zařízení. Přes veškerou snahu konstruktérů a výrobců mikrovlnných komor, zajistit co nejbezpečnější provoz, se stále vyskytují případy, kdy dochází k závažnému selhání s následkem požáru Obr. 15. K těmto situacím došlo v minulosti například v Continental Barum s.r.o. v Otrokovicích, či v Continental Matador Rubber s.r.o. na Slovensku, ale i v jiných podnicích v Německu, nebo v USA.

Důvody takového selhání mohou být různé. Může se jednat o:

- závadu na elektroinstalaci zařízení
- nedostatečné technické vybavení (snímače teploty, kouře)
- nedostatečné bezpečnostní prvky (integrováný hasicí systém)
- vznik „hot spots“ (horké zóny)
- jiné důvody (neodborná manipulace,...)
-

Pro průmyslová mikrovlnná zařízení platí funkční normy a nařízení, které mají zajišťovat bezpečný provoz. Jedná se o normy kategorie 83 - Ochrana životního prostředí, pracovní a osobní ochrana, bezpečnost strojních zařízení a ergonomie. Dále kategorie 33 - Elektrotechnika – Elektrotechnické předpisy. [11]

Patří mezi ně například:

- ČSN EN ISO 12100-2
- ČSN EN ISO 13857
- ČSN EN 294
- ČSN EN 953
- ČSN EN 60204
- ČSN ISO 3864
- EN 55014

Dle § 12. odst. 4 písm. a) zákona č.22/1997 Sb. musí vlastnosti mikrovlnných zařízení splňovat základní požadavky stanovené v nařízení vlády a technických předpisech a musí být za podmínek obvyklého, popřípadě výrobcem určeného použití bezpečné.

Důležitou otázkou je také použití vhodného typu hasicího systému, který by měl eliminovat vznik škod na zdraví a majetku uživatelů v případě vzniku požáru. Mikrovlnná zařízení se

skládají z elektronických komponentů. Při vzniku požáru a následném hašení může nesprávně zvolený hasicí systém napáchat daleko větší škody, než samotný požár. Je tedy nezbytné se, již v prvotním návrhu konstrukce, zabývat vhodnými variantami likvidace požárů. Hlavními prioritami při vzniku takové situace jsou:

- ochrana zdraví a životů pracovníků
- zamezení rozšíření požáru
- eliminace škod na výrobních strojích a zařízeních
- eliminace škod na zpracovávaném materiálu

V dnešní době existuje celá řada „šetrných“ hasicích systémů, které jsou dostatečně účinné a nenapáchají zbytečné škody. Jedná se především o hašení inertními plyny, a to buď samotnými, či jejich směsí. Používá se například oxid uhličitý, dusík, argon, nebo směs těchto inertních plynů „Inergen“ (52 % dusíku + 40 % argonu + 8 % oxidu uhličitého). Tento systém lze aplikovat do stabilních, ale i přenosných zařízení. Alternativou může být i použití kapalného dusíku, který razantně sníží teplotu kritického místa a po přechodu do plynné fáze sníží obsah kyslíku, což je podmínka úspěšného uhašení požáru. [12]

Společně s instalovanými hasicími systémy musí být zařízení jištěno i odpovídající detekcí požáru.

7 SOUHRN TEORETICKÉ ČÁSTI

Mikrovltná technologie se uplatňuje v mnoha odvětvích průmyslu a to již od poloviny minulého století. Díky příznivým provozním nákladům a vysoké účinnosti si nachází své místo ve stále nových alternativách využití. Je však nezbytné zabývat se hlouběji otázkami bezpečnosti provozu MW zařízení. Dále je třeba zkoumat možnosti eliminace nežádoucích jevů při využívání této technologie, jako je například tvorba horkých zón – hot spots.

Cílem této práce je odhalení bezpečnostních rizik při ohřevu přírodního kaučuku mikrovlnným zařízením a navržení odpovídajícího řešení možných krizových situací.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Cílem této práce je vlastní zjištění vlivu provozních podmínek na DE ohřev kaučuku. Jak již bylo výše popsáno, přehřev kaučuku před zpracováním je velmi významnou částí technologického postupu výroby kaučukové směsi. A to zejména z hlediska ekonomického, ale i z pohledu výrobního. Při zpracování přehřátého kaučuku se významně zkracuje výrobní čas, snižuje se spotřeba energií a také se tímto prodlužuje životnost výrobního zařízení.

DE ohřev surového kaučuku známe již řadu let, přesto se stále vyskytují nežádoucí vlivy, při kterých dochází ke vzniku požárů. Provozovatelé nejsou vždy schopni zajistit naprostou bezpečnost této technologie. Následky těchto krizových situací bývají zpravidla fatální. Náklady na opětovné zprovoznění jsou často velmi vysoké. Skutečným cílem této práce je zjištění průběhu těchto nestandardních a nežádoucích situací, k nimž požáry DE zařízení bezesporu patří.

9 POSTUP PRÁCE

Abychom byli schopni objektivně posoudit podmínky provozu DE zařízení a jejich vliv na ohřev kaučuku, musíme se na věc podívat z blízka. Je nutné vytvoření shodných, či alespoň velmi podobných, provozních podmínek v laboratorním prostředí, ve kterém budeme schopni analyzovat důvody vzniku, ale i samotný průběh krizových situací. Přivedeme přírodní kaučuk až na hranici bezpečnosti a budeme sledovat jeho změny a chování během absorpce DE energie. Z tohoto pak vyvodíme odpovídající závěr a stanovíme provozní podmínky, které zajistí bezpečný provoz zařízení na ohřev kaučuku pomocí mikrovlnného záření.

10 PRACOVNÍ PODMÍNKY

Jak již bylo řečeno, laboratorní pracovní podmínky musí být nastaveny tak, aby se co možná nejvíce přibližovali skutečnému provozu. Z tohoto důvodu je třeba zvolit odpovídající technické vybavení.

10.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ

- Mikrovlnné zařízení



Obr. 16 Tandemové laboratorní mikrovlnné zařízení

Jedná se o kombinované mikrovlnné zařízení, které se skládá ze dvou nezávislých zdrojů. Základnou (interním zdrojem) je klasické mikrovlnné zařízení, které je běžně komerčně využíváno, Profesor MTE – 235 BX o výkonu 900 W. Výhodné je variabilní nastavení výkonu v procentech. Druhý (externí) zdroj elektromagnetického záření je zařízení firmy Romill MWG – LAB o výkonu 900 W. Tento externí zdroj, jak je vidět na obr. 16, je nainstalován tak, aby se záření mikrovln protínalo se zářením standardního zařízení (mikrovlny jsou přiváděny vlnovodem shora). Tímto je dosažena homogenizace mikrovlnného pole.

- **Vpichový digitální snímač teploty**



Obr. 17 Digitální vpichový teploměr

Tento teploměr: THERM – 2220-12 pracuje v rozsahu teplot od -70°C do 500°C na principu roztažnosti kovů (NiCr-Ni). Jeho nespornou výhodou je tenká vpichová jehla, která minimalizuje riziko zásadního poškození měřených vzorků.

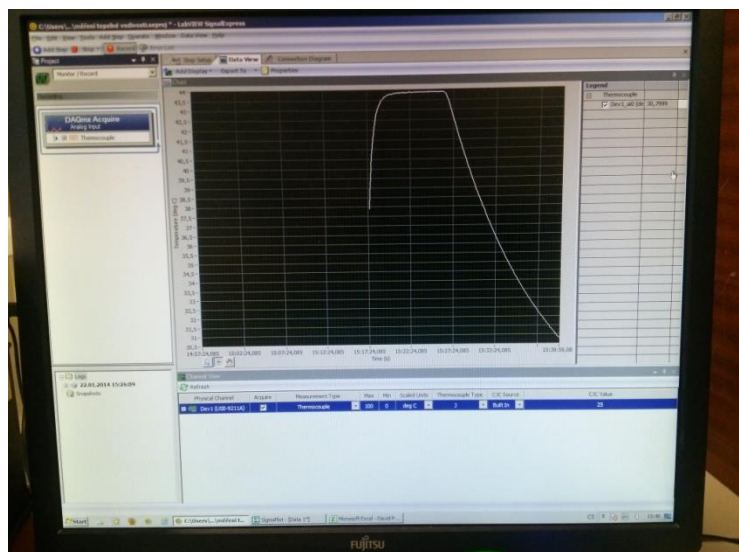
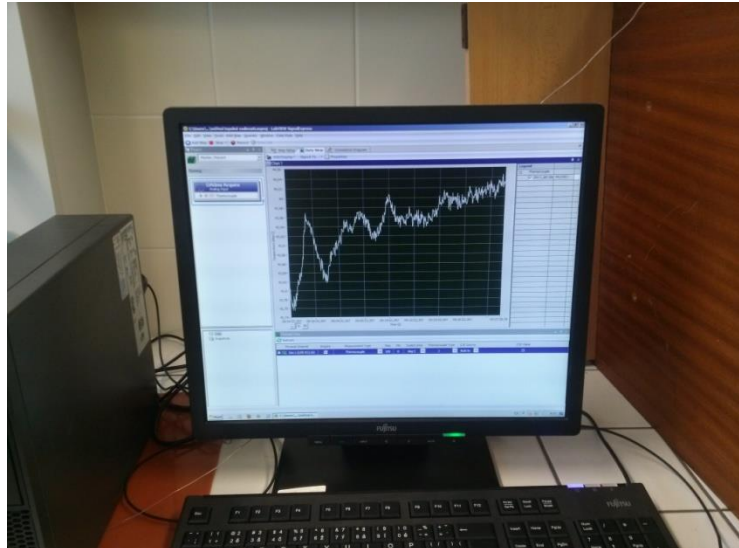
- Laboratorní lis



Obr. 18 Laboratorní lis

Vulkanizační lis s ručním ovládním lisovacího tlaku a s regulovaným elektrickým vyhříváním od firmy Mitas. Toto zařízení je opatřeno lisovacími deskami o rozměrech 300 x 250 mm. Pro zvýšení lisovacího tlaku lze použít hydraulické pákové zdvihací zařízení (panenka). Součástí lisu jsou vymezovací rámečky pro zajištění tvaru výlisků. Lis pracuje s příkonem 1100 W.

- Výpočetní technika/ programové vybavení



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	100.0000	41.7043	29.0379	41.9383	6.829e-3	0.0000	44.8022			
2	100.0000	41.8213	31.1943	41.8337	0.0174	0.0000	44.4236			
3	100.0000	41.7071	41.7183	41.7183	-6.863e-3	15.5000	44.7207			
4	100.0000	41.8262		41.9331	3.829e-3	38.7000	44.8772			
5	100.0000	41.8043		41.8721	-4.482e-3	20.0000	43.9055			
6	100.0000	41.8233		41.8540	-3.009e-4	31.2000	43.7352			
7	100.0000	41.7291		41.2337	4.820e-3	33.5000	43.5664			
8	100.0000	41.2222		41.1182	4.970e-3	43.7000	43.3991			
9	100.0000	41.8103		41.8516	-0.0136	38.0000	43.7232			
10	100.0000	41.8103		40.8938	6.902e-3	36.2000	43.0888			
11	100.0000	40.7713		40.7708	-4.417e-3	43.5000	43.9039			
12	100.0000	40.8044		40.8587	6.942e-3	48.7000	42.7481			
13	100.0000	40.8491		40.4313	2.307e-3	31.0000	43.3494			
14	100.0000	40.4991		40.4308	8.719e-3	61.2000	43.4238			
15	100.0000	40.2942		40.2100	-0.0247	57.0000	42.2088			
16	100.0000	40.1916		40.2000	-0.2364	61.7000	43.1127			
17	100.0000	40.0994		40.0779	1.912e-3	100.0000	41.9383			
18	100.0000	39.9792		39.9881	8.104e-3	180.2000	41.8022			
19	100.0000	39.8616		39.8799	-0.0182	112.0000	41.6125			
20	100.0000	39.7192		39.7122	8.383e-3	138.7000	41.5011			
21	100.0000	39.6676		39.6699	2.630e-3	135.0000	41.5041			
22	100.0000	39.5226		39.5286	4.832e-3	111.2000	41.2961			
23	100.0000	39.4149		39.4102	-0.0111	157.0000	41.0591			
24	100.0000	39.2611		39.2482	2.893e-3	141.7000	40.8147			
25	100.0000	39.1298		39.1244	-0.0111	138.0000	40.7568			
26	100.0000	39.1372		39.1407	-3.193e-3	158.2000	40.6283			
27	100.0000	39.0182		39.0111	-0.037e-3	161.0000	40.4804			
28	100.0000	38.9211		38.9382	-0.0141	168.7000	40.3483			
29	100.0000	38.8192		38.8111	-0.0211	151.0000	40.2088			
30	100.0000	38.7196		38.7196	7.840e-3	181.2000	40.1074			
31	100.0000	38.6222		38.6199	-0.0128	181.0000	39.9141			
32	100.0000	38.5166		38.5166	-3.123e-3	203.7000	39.7889			
33	100.0000	38.4175		38.4175	-2.389e-3	200.0000	39.6648			
34	100.0000	38.3184		38.3189	4.637e-3	208.2000	39.5402			
35	100.0000	38.2193		38.2123	8.382e-3	232.0000	39.4160			
36	100.0000	38.1188		38.1187	0.0122	248.7000	39.2916			
37	100.0000	38.0199		38.0111	-8.420e-3	233.0000	39.1687			
38	100.0000	37.9182		37.9182	1.970e-3	251.0000	39.0452			
39	100.0000	37.8188		37.8122	7.638e-3	231.0000	38.9202			
40	100.0000	37.7188		37.7188	0.0288	243.7000	38.7957			
41	100.0000	37.6192		37.6172	3.949e-3	251.0000	38.6708			
42	100.0000	37.5192		37.5192	0.0000	268.0000	38.5459			
43	100.0000	37.4192		37.4112	-8.410e-3	243.0000	38.4210			
44	100.0000	37.3192		37.3192	0.0000	268.0000	38.2961			
45	100.0000	37.2192		37.2192	0.0000	268.0000	38.1712			
46	100.0000	37.1192		37.1192	0.0000	268.0000	38.0463			
47	100.0000	37.0192		37.0192	0.0000	268.0000	37.9214			
48	100.0000	36.9192		36.9192	0.0000	268.0000	37.7965			

Obr. 19-21 Výpočetní a programové vybavení

Při zjišťování tepelné vodivosti zkoumaných vzorků bylo využito výpočetní techniky laboratoře UTB ve Zlíně. Naměřené hodnoty se zpracovávaly programem Labview-signal express. Data pro výpočty byly snímány měřicím zařízením, podle Fitche, na zjištění prostupnosti tepla viz obr. 22.



Obr. 22 Snímání prostupu tepla

Toto zařízení pracuje na principu měření rychlosti zahřívání snímané podložky od měřeného vzorku. Pro zajištění konstantní teploty je využito temperovaných mosazných destiček, které jsou napojeny na temperanční jednotky s předem nastavenými teplotami. Snímaná teplota je směřována do výpočetního programu, který v pravidelných časových intervalech provádí vyhodnocení koeficientu tepelné vodivosti vzorku pomocí nelineární regrese naměřené závislosti teploty na čase.

- **Termovizní kamera FLIR T 335**



Obr. 23 Termovizní kamera FLIR T 335

Tato termo kamera byla zapůjčena od firmy Smart Plast s.r.o. Je určena pro profesionální náměry. Velkou předností této kamery je velký 3.5“ LCD dotykový displej, laser pro přesné zaměření a stupeň krytí IP54 (ochrana proti stříkající vodě a prachu). Dále nabízí funkci obraz v obraze, kde dochází k propojení reálného snímku s termo snímkem přímo v přístroji, zvukový záznam po dobu 60 vteřin, použití Extech přístrojů (např. klešťový ampérmetr) přes Bluetooth a integrovaný digitální fotoaparát 3,1Mpx s osvětlovací diodou. Tento model nabízí řadu vyhodnocovacích a měřících funkcí (až 5 bodů a 5 oblastí měření s MIN/MAX/průměr, izotermy či automatickou detekci teplých a studených bodů ve vybrané oblasti).

Technické parametry

Rozlišení detektoru	320 x 240
Typ detektoru	nechlazený mikrobolometr
Frekvence	9Hz, 30Hz
Teplotní rozsahy	-20°C až 150°C 0°C až 350°C 200°C až 650°C
Citlivost detektoru	0,05°C
Přesnost	2°C nebo 2%
Ostření	automatické / manuální
Zoom	1-2x digitální zoom
Stupeň krytí	IP 54
Hmotnost	880 g (včetně baterie)

11 ZÁTĚŽOVÉ TESTY ZAŘÍZENÍ

Pro zajištění správnosti měření bylo nezbytné provést zátěžové testy mikrovlnného zařízení. Postupně byly provedeny zkoušky, jejichž podstatou bylo vyhodnocení spolehlivosti a účinnosti použitého mikrovlnného zařízení. Pro tyto testy byla použita zátěž v podobě destilované vody o konstantním objemu 800 ml. Tyto vzorky byly testovány na vliv procesních podmínek při použití 1. interního zdroje, 2. externího zdroje, 3. obou zdrojů mikrovlnného zařízení současně. Výkon jednotlivých zdrojů byl regulován, a to od minimálních hodnot po hodnoty maximální.

Test interního zdroje mikrovlnného zařízení Profesor MTE – 235 BX

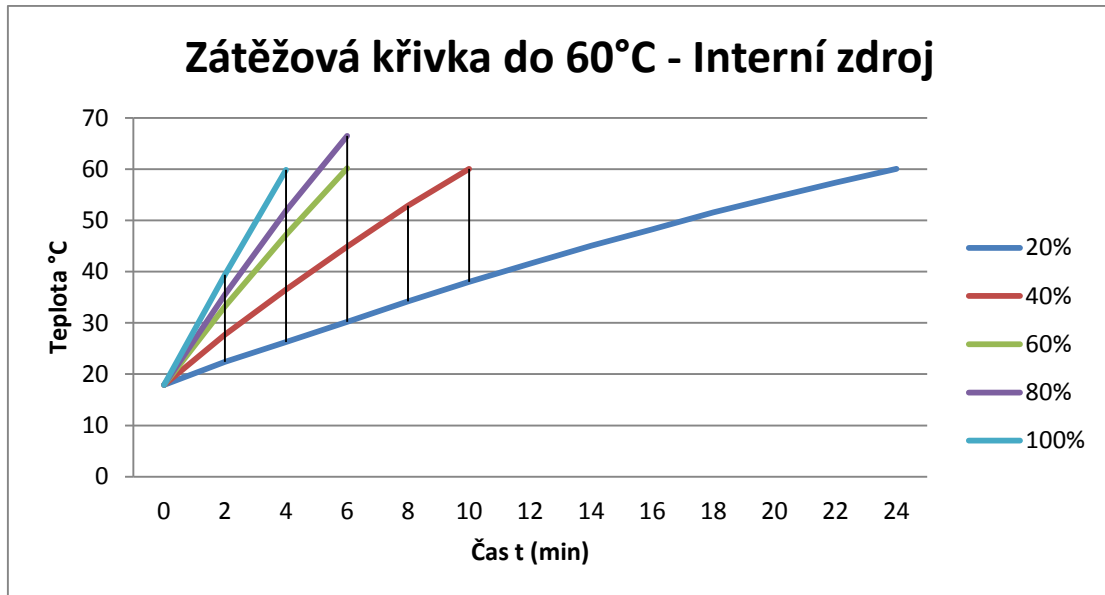
Parametry procesu

Zátěž	800 ml vody
Cyklus	2 minuty
Výkon	20, 40, 60, 80, 100 %
Počáteční teplota	17,9°C
Cílová teplota	60°C
Příkon zařízení	1400 W

Naměřené hodnoty teploty (°C) při změnách výkonu zařízení

Výkon (%)	20%	40%	60%	80%	100%
Čas (min)					
0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
2	22,4	27,7	33,2	35,5	39,4
4	26,3	36,5	47,2	51,9	59,9
6	30,2	44,9	60,2	66,5	
8	34,2	52,9			
10	38	60,1			
12	41,6				
14	45,1				
16	48,3				
18	51,6				
20	54,5				
22	57,4				
24	60,1				

Tab. 2 Zátěžový test interního zdroje – náměry teploty (°C)



Obr. 24 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na výkonu interního zařízení

Z grafu je patrné, že při vzrůstajícím výkonu mikrovlnného záření se podstatným způsobem zkracuje potřebný čas k dosažení cílové teploty. Je zřejmé, že zařízení pracuje správně. Pro komplexní analýzu byly, pro každý jednotlivý výkon, spočítány hodnoty skutečného výkonu zařízení a jeho účinnost.

Výpočty účinnosti:

Výkon (W)

$$P = Q/t \quad (3)$$

Teplo (J)

$$Q = \Delta T * Cp * m \quad (4)$$

Účinnost (%)

$$\eta = \frac{P_{stř}}{P_{\Phi}} * 100 \quad (5)$$

Kde:

 $P_{stř}$ – střední výkon (W) η – účinnost (%) P_o - příkon (W) ΔT - změna teploty (°C) C_p - měrná kapacita (J/kgK) m – hmotnost (kg) Q - teplo(J) t - čas (s)**Výpočet účinnosti zařízení při 20% výkonu zařízení**

t (s)	m (kg)	T_o (°C)	ΔT (°C)	C_p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	$P_{stř.}$ (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	109,4	7,8
120		22,4	4,5		15069,6	125,58		
240		26,3	8,4		28129,92	117,208		
360		30,2	12,3		41190,24	114,4173		
480		34,2	16,3		54585,44	113,7197		
600		38	20,1		67310,88	112,1848		
720		41,6	23,7		79366,56	110,2313		
840		45,1	27,2		91087,36	108,4373		
960		48,3	30,4		101803,52	106,0453		
1080		51,6	33,7		112854,56	104,495		
1200		54,5	36,6		122566,08	102,1384		
1320		57,4	39,5		132277,6	100,2103		
1440		60,1	42,2		141319,36	98,13844		

Tab. 3 Účinnost interního zdroje při 20% výkonu

Výpočet účinnosti zařízení při 40% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T_o (°C)	ΔT (°C)	C_p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	$P_{stř.}$ (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	252,8	18
120		27,7	9,8		32818,24	273,4853		
240		36,5	18,6		62287,68	259,532		
360		44,9	27		90417,6	251,16		
480		52,9	35		117208	244,1833		
600		60,1	42,2		141319,36	235,5323		

Tab. 4 Účinnost interního zdroje při 40% výkonu

Výpočet účinnosti zařízení při 60% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T ₀ (°C)	ΔT (°C)	C _p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	P _{stř.} (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	409,8	29,3
120		33,2	15,3		51236,64	426,972		
240		47,2	29,3		98119,84	408,8327		
360		60,2	42,3		141654,24	393,484		

Tab. 5 Účinnost interního zdroje při 60% výkonu

Výpočet účinnosti zařízení při 80% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T ₀ (°C)	ΔT (°C)	C _p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	P _{stř.} (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	472,6	33,8
120		35,5	17,6		58938,88	491,1573		
240		51,9	34		113859,2	474,4133		
360		66,5	48,6		162751,68	452,088		

Tab. 6 Účinnost interního zdroje při 80% výkonu

Výpočet účinnosti zařízení při 100% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T ₀ (°C)	ΔT (°C)	C _p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	P _{stř.} (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	593	42,4
120		39,4	21,5		71999,2	599,9933		
240		59,9	42		140649,6	586,04		

Tab. 7 Účinnost interního zdroje při 100% výkonu

Výpočty prokázaly souvislost mezi nastaveným výkonem zařízení a jeho účinností. S rostoucím výkonem roste i procentní účinnost.

Test externího zdroje mikrovlnného zařízení Romill MWG – LAB

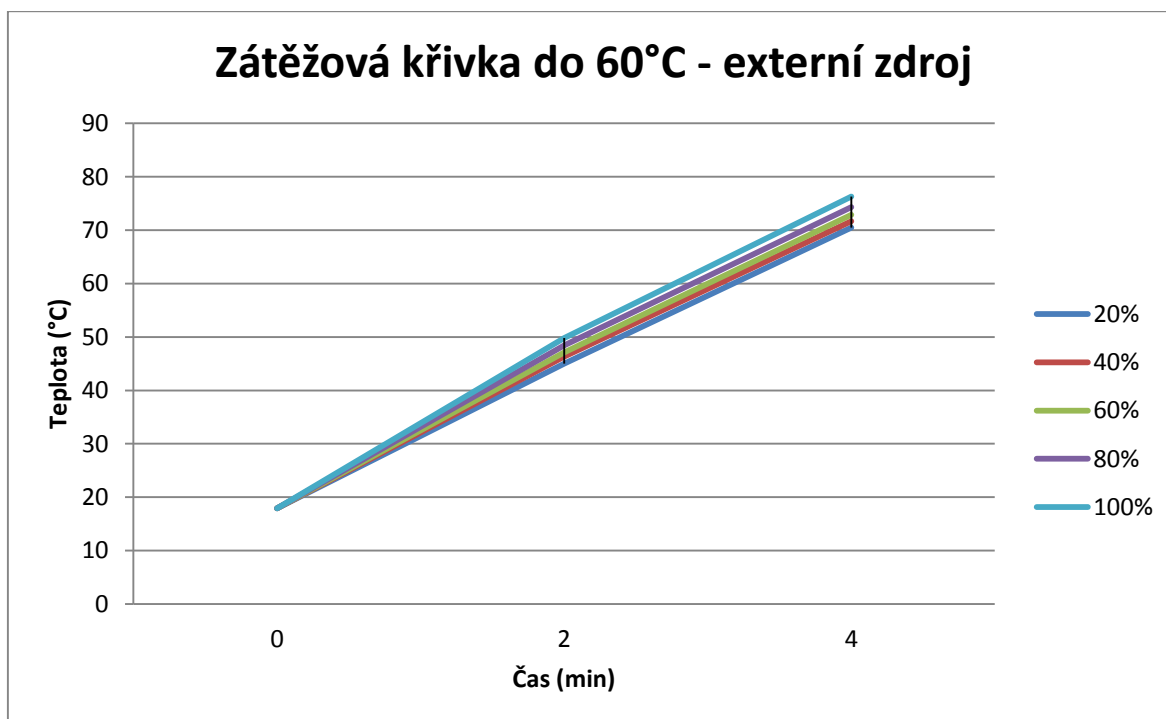
Parametry procesu

Zátěž	800 ml vody
Cyklus	2 minuty
Výkon	20, 40, 60, 80, 100 %
Počáteční teplota	17,9°C
Cílová teplota	60°C
Příkon zařízení	2250 W

Naměřené hodnoty teploty (°C) při změnách výkonu zařízení

Výkon (%)	20%	40%	60%	80%	100%
Čas (min)					
0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
2	45	46,3	47,1	48,4	49,8
4	70,5	71,7	72,9	74,3	76,3

Tab. 8 Zátěžový test interního zdroje – náměry teploty (°C)



Obr. 25 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na výkonu externího zařízení

Z naměřených hodnot vyplynulo, že externí zdroj mikrovlnného záření nepracuje správným způsobem. Byla zjištěna vada reostatu zařízení. Nebylo možné zajistit dostatečnou regulaci výkonu zařízení. Jakékoliv nastavení (mimo nastavení na 100 %) bylo velmi nestabilní a během zátěžových zkoušek se samovolně měnily hodnoty skutečného výkonu. Vzhledem k situaci byl pro další zkoušky brán v potaz pouze výkon 100%. Pro úplnost zde publikuji i hodnoty naměřené se systémovou chybou, nejsou však zahrnuty do výpočtů a nikterak neovlivňují celkové závěry této práce.

Výpočet účinnosti zařízení při 100% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T ₀ (°C)	ΔT (°C)	C _p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	P _{stř.} (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	852,5	37,9
120		49,8	31,9		106826,7	890,2227		
240		76,3	58,4		195569,9	814,8747		

Tab. 9 Účinnost externího zdroje při 100% výkonu

Test vzájemného působení interního a externího zdroje mikrovlnného zařízení

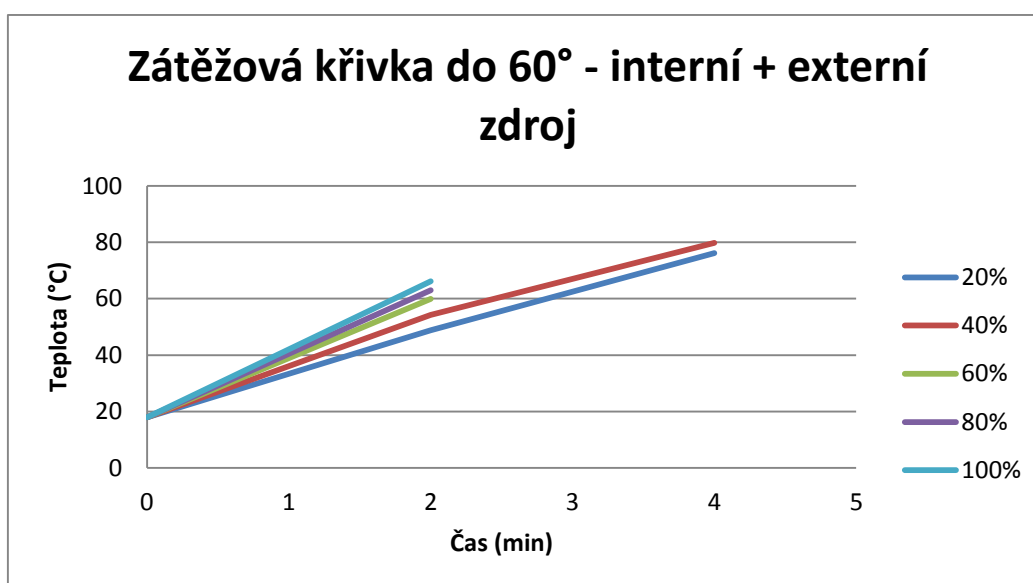
Parametry procesu

Zátěž	800 ml vody
Cyklus	2 minuty
Výkon	20, 40, 60, 80, 100 %
Počáteční teplota	17,9°C
Cílová teplota	60°C
Příkon zařízení	3650 W

Naměřené hodnoty teploty (°C) při změnách výkonu zařízení

Výkon (%)	20%	40%	60%	80%	100%
Čas (min)					
0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
2	48,8	54,2	59,9	63	66,2
4	76,2	79,8			

Tab. 10 Zátěžový test interního a externího zdroje – náměry teploty (°C)



Obr. 26 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na společném výkonu interního a externího zdroje

Výpočet účinnosti zařízení při 100% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T_0 (°C)	ΔT (°C)	C_p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	$P_{stř.}$ (W)	η (%)
0	0,8	17,9	0	4186	0	0	1347,9	36,9
120		66,2	48,3		161747	1347,892		

Tab. 11 Účinnost obou zdrojů dohromady při 100% výkonu

Vyhodnocení zátěžových testů

Testy byly provedeny za přibližně stejných provozních podmínek s minimální časovou prodlevou. Výsledky testů prokázaly předpokládanou vzájemnou souvislost mezi časovým působením výkonu zařízení a teplotou subjektu. Zkušební testy navíc odhalily systémovou chybu, která by v pozdější době mohla negativním způsobem ovlivnit následující testování, čímž by docházelo k mylným závěrům a tím k znehodnocení celé práce.

12 TEST OHŘEVU PŘÍRODNÍHO KAUČUKU

Pro zjištění nastavení optimálních procesních podmínek byl proveden test mikrovlnného ohřevu na vzorku přírodního kaučuku s označením SIR 20 CV/BP1. Tento test měl za úkol objasnit chování přírodního kaučuku při mikrovlnném ohřevu nad teplotu, na kterou se v gumárenských provozech předežívá. Byly sledovány výskyty nežádoucích jevů (Hot-spots). Předežívání přírodních kaučuků pro zpracovatelské použití se provádí v rozsahu teplot 45°C – 55°C.

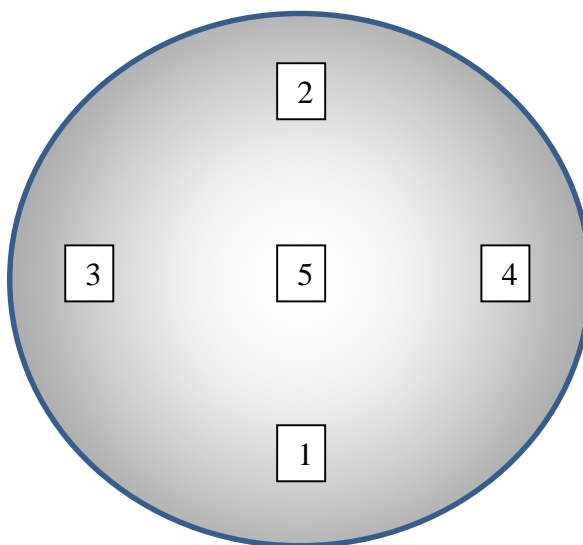
12.1 Chování přírodního kaučuku při aplikaci mikrovlnné energie

Pro tento test byl použit vzorek přírodního kaučuku SIR 20 CV/BP1 o hmotnosti 2800g, který je běžně používán při výrobě kaučukových směsí. Jako zdroj mikrovlnné energie byl zvolen interní zdroj zařízení Profesor MTE – 235 BX. Pro lepší přehlednost měření byl vzorek rozdělen do pěti sektorů, ve kterých probíhala jednotlivá měření

Parametry procesu

Zátěž	Blok Ø 200 h 50 (mm)
Cyklus	3 minuty
Výkon	60%
Počáteční teplota	16,8°C

Pozice měření



Obr. 27 Mapa pozic měření teploty

Výsledky náměrů teploty při mikrovlnném ohřevu přírodního kaučuku

Pozice Čas (min)	Pozice 1 (°C)	Pozice 2(°C)	Pozice 3(°C)	Pozice 4(°C)	Pozice 5 (°C)	Průměrná T (°C)
0	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
3	42,6	24,3	20,6	18,6	17,4	24,7
6	50,4	32,6	25,6	25,6	29,4	32,72
9	61,7	36,2	29,2	29,3	43,2	39,92
12	81,4	53,2	38,6	36,1	48,2	51,5
15	95,4	60,6	46,4	40,5	61,7	60,92
18	103,6	67,1	53,7	56,2	68,9	69,9
21	113,4	90,7	61,5	66	84,8	83,28
24	115,8	113,8	71,8	79,3	94,8	95,1
27	123,4	120	81,2	82,5	101,5	101,72
30	127,6	128,1	83,2	92,7	112,1	108,74
33	133,8	126,4	93,8	91,4	118,1	112,7

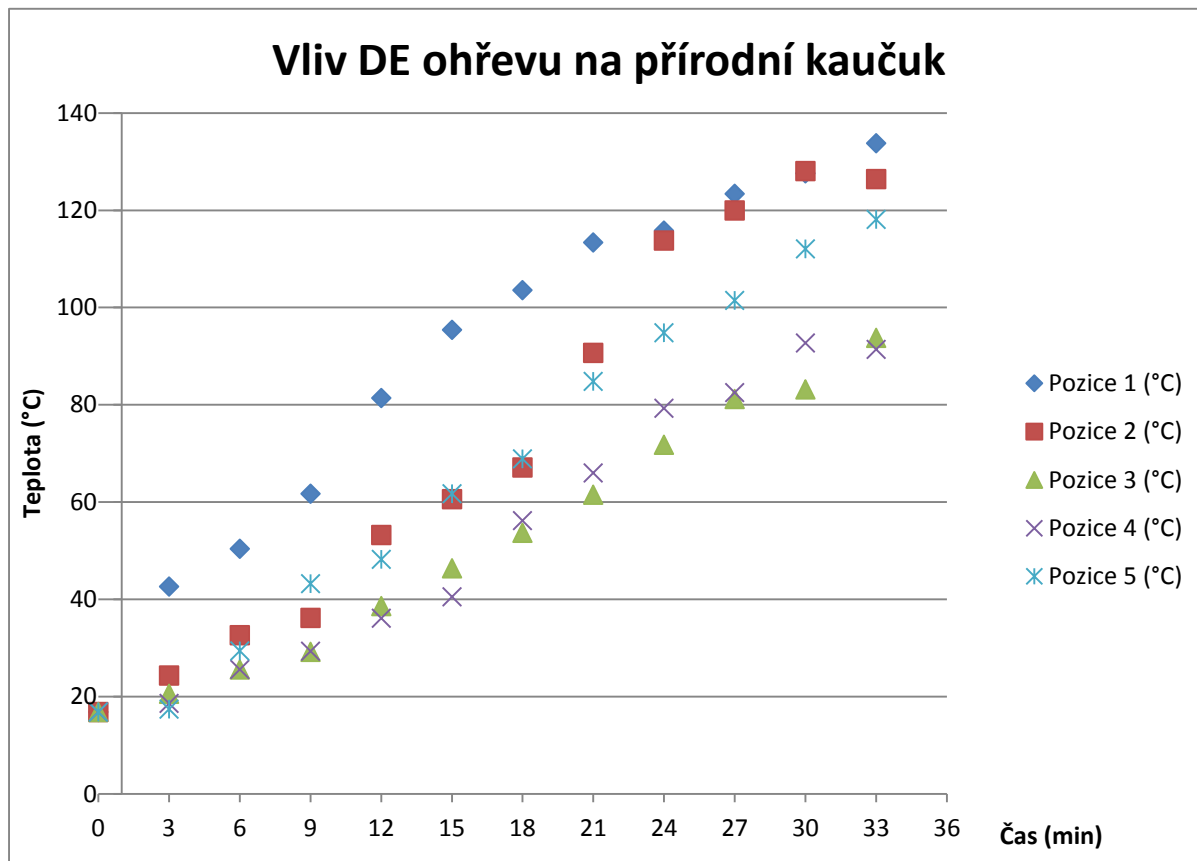
Tab. 12 Test ohřevu přírodního kaučuku

Výpočet účinnosti zařízení při 60% výkonu zařízení

t (s)	m (kg)	T ₀ (°C)	ΔT (°C)	C _p (J/kgK)	Q (J)	P (W)	P _{stř.} (W)	η (%)
0	2,8	16,8	0	1890	0	0	258	47,8
180		24,7	7,9		41806,8	232,26		
360		32,72	15,92		84248,64	234,024		
540		39,92	23,12		122351	226,576		
720		51,5	34,7		183632,4	255,045		
900		60,92	44,12		233483	259,4256		
1080		69,9	53,1		281005,2	260,19		
1260		83,28	66,48		351812,2	279,216		
1440		95,1	78,3		414363,6	287,7525		
1620		101,72	84,92		449396,6	277,4053		
1800		108,74	91,94		486546,5	270,3036		
1980		112,7	95,9		507502,8	256,3145		

Tab. 13 Účinnost interního zdroje při 60% výkonu

Grafické znázornění vlivu mikrovlnné energie na přírodní kaučuk a vzniku hot – spots.



Obr. 28 Grafické znázornění nárůstu teploty přírodního kaučuku

Graf vyjadřuje vývoj teplot v určitém časovém rozhraní v předem definovaných bodech měřeného vzorku.

Vyhodnocení testu

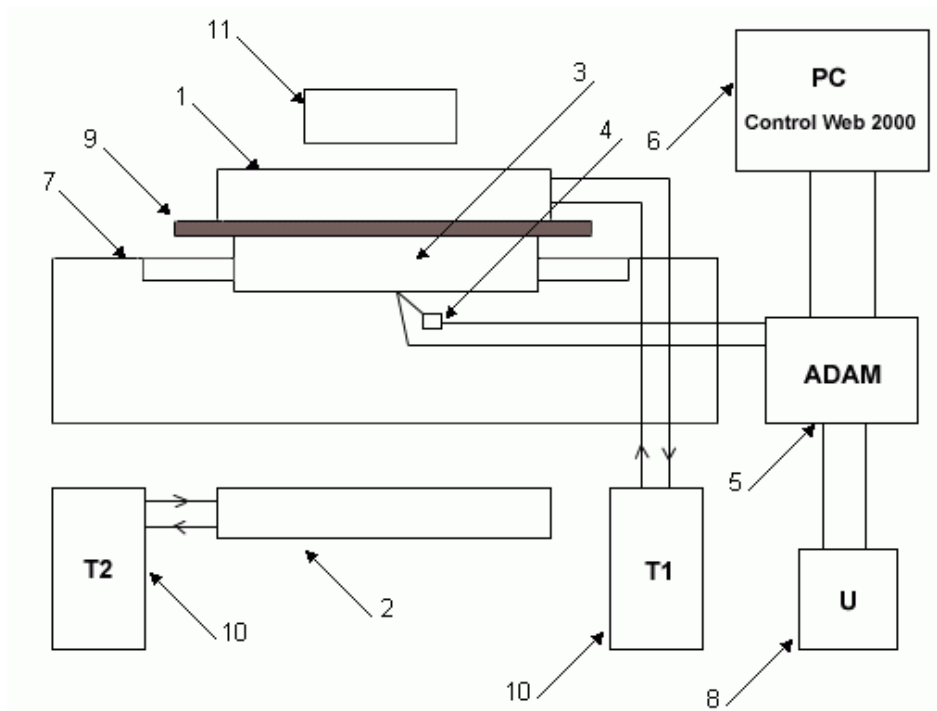
Z výsledků testu je zřejmé, že při vyšších teplotách (při delším působení mikrovln) jsou jasně vymezené lokace s nárůstem teploty (hot-spots). Po 33 minutách bylo dosaženo rozdílu teplot na různých pozicích, až 42,4°C. Největší naměřené teploty byly dosaženy uprostřed objemu vzorku. Směrem k povrchu se teploty snižují.

13 TEPLOTNÍ VODIVOST – PROSTUP TEPLA

V případě, jako je tento, kdy se zabýváme vlivem působení MW technologie na vlastnosti materiálů, je nezbytné znát základní teplotní specifikace těchto materiálů, v našem případě přírodního kaučuku. K tomuto účelu nám dobře poslouží zjištění teplotní vodivosti použitého materiálu.

13.1 Postup měření a výpočtu teplotní vodivosti

K výpočtu teplotní vodivosti musíme nejprve zjistit hodnotu tepelné vodivosti - λ . K tomuto použijeme nestacionární měřící zařízení tepelné vodivosti. K nesporným výhodám tohoto zařízení patří především krátká doba měření, jednoduchost postupu a měřícího zařízení. U nestacionárního vedení tepla se teplota v určitém místě mění s časem. V praxi se nejčastěji setkáme s případem, kdy je teplo vedeno pouze v jednom směru. Teplota je tedy funkcí času a pouze jediné souřadnice. K měření tepelné vodivosti nestacionární metodou se používá přístroje podle Fitcha. Zařízení je zobrazeno na obr. 29. Tohoto přístroje se používá především k měření tepelné vodivosti fólií a desek plastů, pryží a usňových materiálů. [13]



Obr. 29 Schéma měřícího zařízení teplotní vodivosti

Princip měřicího zařízení je následující. Měřený vzorek(9) je vložen mezi mosazný válec (1), který je temperován na teplotu t_1 , a mosazný měřicí válec (3), na který je připojen termočlánek typu měď-konstantan (4). Po vytemperování vzorku na teplotu t_2 je odejmut mosazný válec (1) a je přiložen mosazný válec (2), který je temperován na teplotu t_1 . Současně je spuštěno snímání teploty pomocí upraveného modulu Control Web 2000 na osobním počítači (6), který data převádí převodním systémem ADAM 5 přes komunikační port do osobního počítače (6). Měřená teplota postupně roste směrem k ustálené teplotě t_2 a snímání dat je ukončeno. Získaný soubor obsahuje závislost času na teplotě. Dále je možno spustit vyhodnocení tohoto souboru pomocí programu NeReg02 na osobním počítači (6) nebo pokračovat v měření dalších vzorků. Součástí měřicího zařízení jsou také termostaty (10), udržující teploty t_1 a t_2 , stabilizovaný stejnosměrný zdroj (8), izolační kryt měřicího válce (7) a závaží (11). Část (7) slouží k tepelné izolaci měřicího válce (3), a také k zabránění tepelných ztrát do okolí. [13]

Model výpočtu tepelné vodivosti:

$$-K \frac{dt}{d\tau} = \frac{S\lambda(t-t_1)}{\delta} + B(t-t_1) \quad (6)$$

Kde:

K - tepelná kapacita měřicího válečku ($J.K^{-1}$)

S - plocha vzorku (m^2)

λ - tepelná vodivost ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

t - snímaná teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)

t_1 - teplota temperované desky ($^{\circ}C$)

t_2 - počáteční teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)

δ - tloušťka vzorku (m)

B - koeficient tepelných ztrát ($J.s^{-1}.K^{-1}$)

τ - čas (s)

pro B platí:

$$B = \alpha \cdot S_z \quad (7)$$

Kde:

α je koeficient přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

S_z - plocha, na níž dochází ke ztrátám (m^2)

Pravá strana rovnice (1) představuje tok tepla přes hmotu vzorku bloku 1 do měřicího válečku. Zde jsou započítány i ztráty tepla vzniklé přirozeným prouděním vzduchu kolem měřicího přístroje.

Levá strana rovnice (1) představuje akumulaci tepla v měřicím válečku.

Řešením rovnice (1) dostaneme:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) * e^{-(A_1+A_2)\tau} \quad (8)$$

kde pro A_1 a A_2 platí vztahy:

$$A_1 = \frac{S\lambda}{\delta K} \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{B}{K} \quad (10)$$

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (11)$$

Praktický výpočet:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) * e^{-(A_1+A_2)\tau}$$

$$y = y_0 + ae^{(-bx)} \quad (12)$$

Z nelineární regrese získáme koeficient b.

$$A_1 = b - A_2 \quad (13)$$

Příklad výpočtu: Vzorek č. 1 (RSS – 3)

Z nelineární regrese jsme získali $b=1,5751 \times 10^{-3}$

$$A_1 = b - A_2 = 1,5751 \times 10^{-3} - 1,6737 \times 10^{-5} = 1,5584 \times 10^{-3}$$

$$\lambda = \frac{A_1 \delta K_1}{S} = \frac{1,5584 \times 10^{-3} * 0,002217 * 94,107}{\frac{\pi 0,05^2}{4}} = 0,1656 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Tepelná kapacita měřícího válečku: $K_1 = 94,107 \text{ (J.K}^{-1}\text{)}$

Plocha měřícího válečku: $S = 1,9635 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$

Tepelná vodivost přírodního kaučuku RSS – 3 je dle výpočtu $0,1656 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Pro výpočet teplotní vodivosti -a- (přestup tepla) platí vztah:

$$a = \frac{\lambda}{Cp * \rho} \quad (14)$$

Kde:

λ - tepelná vodivost ($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)

Cp - měrné teplo při konstantním tlaku ($\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

ρ - hustota (kg/m^3)

$$a = \frac{\lambda}{Cp * \rho} = \frac{0,1656}{1890 * 920} = 99,626 * 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Teplotní vodivost přírodního kaučuku RSS – 3 je dle výpočtu $99,626 * 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

13.1.1 Příprava, měření a výsledky výpočtů teplotní vodivosti PK

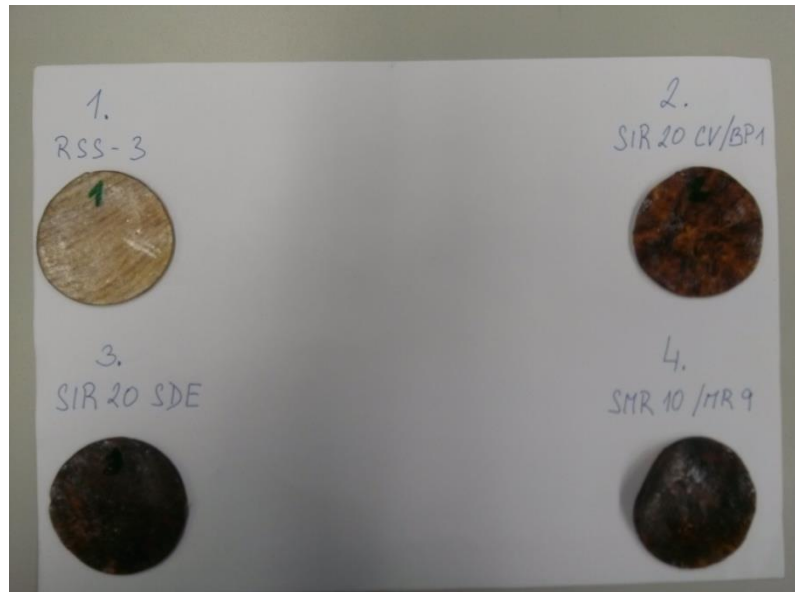
Celkem byly měřeny čtyři druhy přírodního kaučuku:

- RSS – 3
- SIR 20 CV/BP1
- SIR 20 SDE
- SMR 10/MR9

Pro účely této práce byly odebrány, se souhlasem vedení společnosti Continental Barum s.r.o, vzorky přírodních kaučuků. Tyto vzorky (Obr. 30) se musely připravit tak, aby splňovaly rozměrové požadavky. Z menších kusů byly nařezány cca 2 mm silné plátky o rozměru 10 x 10 cm. Tyto pak byly postupně lisovány na laboratorním vulkanizačním lisu kvůli vyhlazení jejich povrchu, který po nařezání nebyl vhodný pro měření tepelné vodivosti. Povrch nebyl stejnoměrný, nebylo by možné zajistit objektivní měření. Po vylisování se pomocí tzv. šajby vysekly finální vzorky připravené pro vlastní měření (Obr. 31).



Obr. 30 Vzorky přírodních kaučuků



Obr. 31 Výlisky vzorků

Takto připravené vzorky se nechaly postupně změřit na nestacionárním měřícím zařízení (Obr. 29). Naměřené hodnoty byly zapisovány a dále použity při vlastních výpočtech viz kapitola 13.1.

Přehled výsledků:

δ - Tloušťka vzorků

δ1	0,002217	m
δ2	0,002134	m
δ3	0,00237	m
δ4	0,002427	m

Tab. 14 Tloušťka vzorků PK

B - Koefficient tepelných ztrát

Měření č.:	1	2
B1	$1,5751 \cdot 10^{-3}$	$1,5818 \cdot 10^{-3}$
B2	$1,6383 \cdot 10^{-3}$	$1,6548 \cdot 10^{-3}$
B3	$1,5414 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$
B4	$1,4199 \cdot 10^{-3}$	$1,4221 \cdot 10^{-3}$

Tab. 15 Výsledné koeficienty tepelných ztrát

λ - Tepelná vodivost

Měření						
č.:	1			2		
λ 1	0,1656	W/mK		0,1663	W/mK	
λ 2	0,16578	W/mK		0,16745	W/mK	
λ 3	0,17323	W/mK		0,17307	W/mK	
λ 4	0,16341	W/mK		0,16366	W/mK	

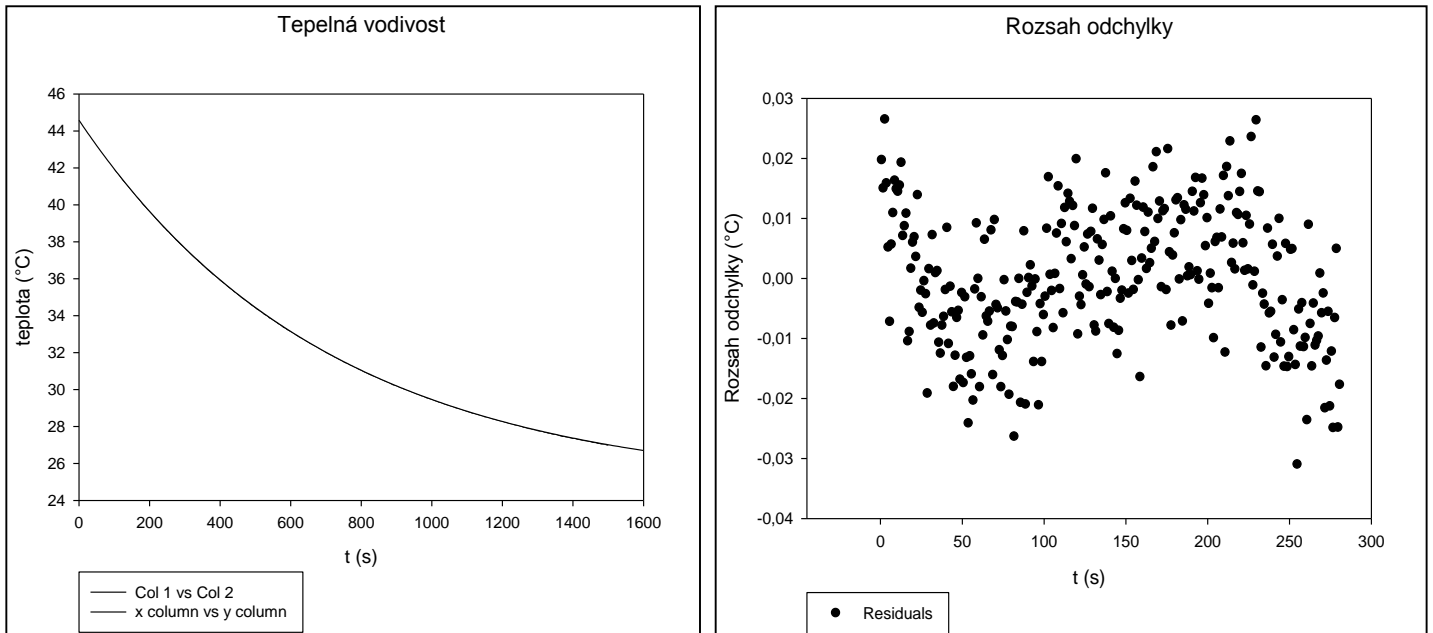
Tab. 16 Výsledky tepelné vodivosti u PK

a - Teplotní vodivost

Měření						
č.:	1			2		
a1	95,328*10 ⁻⁹	m ² /s		95,641*10 ⁻⁹	m ² /s	
a2	95,342*10 ⁻⁹	m ² /s		96,302*10 ⁻⁹	m ² /s	
a3	99,626*10 ⁻⁹	m ² /s		99,534*10 ⁻⁹	m ² /s	
a4	93,978*10 ⁻⁹	m ² /s		95,328*10 ⁻⁹	m ² /s	

Tab. 17 Výsledky teplotní vodivosti u PK

Ukázka grafického znázornění měření tepelné vodivosti:



Obr. 32 Grafické znázornění měření tepelné vodivosti u SMR 10/MR9

14 DEGRADAČNÍ TESTY

Abychom byly schopni objektivně posoudit vlivy MW technologie na přírodní kaučuky, zjistit jejich chování při ohřevu a stanovit bezpečné procesní podmínky, musíme provést takové testy, které nám podají jednoznačné odpovědi na tyto otázky. V tomto případě jsme se zajímali o vznik lokálních míst s výrazně vyšší teplotou, neboli hot-spots. Zajímalo nás kdy, jakým způsobem a za jakých podmínek tyto místa vznikají. S ohledem na bezpečnost procesu jsme chtěli vysledovat, jak se budou místa materiálů s vyšší teplotou chovat při dalším působení účinků mikrovln. Důležitá otázka byla možný vznik požáru a podmínky, které jemu předcházejí. Z těchto důvodů bylo nutné provést testy vedoucí až za hranici de-gradacího bodu použitých materiálů tak, abychom byli schopni tyto podmínky vysledovat a mohli na ně adekvátně reagovat.

14.1 Příprava laboratorních podmínek

K dispozici byly vzorky pěti přírodních kaučuků, které byly tvarově přizpůsobeny tak, aby byl optimálně využit pracovní prostor mikrovlnné komory zařízení viz. Obr. 30. Pro zajištění bezpečnosti pokusu se musela přijmout bezpečnostní opatření, která by případně zabránila vzniku požáru. Byla nachystána nádoba s vodou pro případ nutnosti okamžitého uhašení. Dále byl připraven hasicí přístroj k rychlému použití v případě nebezpečí.

K vyhodnocování teplotních nárůstů bylo použito dvou na sobě nezávislých měřících zařízení. Jednalo se o vpichový digitální snímač teploty a o termovizní kameru. Oba přístroje jsou popsány v kapitole 10.1 Použité vybavení.

Pro všechny testy byla použita maximální hodnota výkonu obou zdrojů mikrovlnného záření při společném působení (interní i externí).

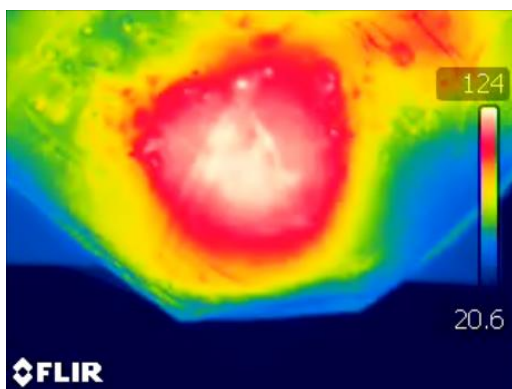
Jednotlivé průběhy testů jsou popsány níže.

14.1.1 Test č. 1 : PK – SIR 20 CV/BP 1

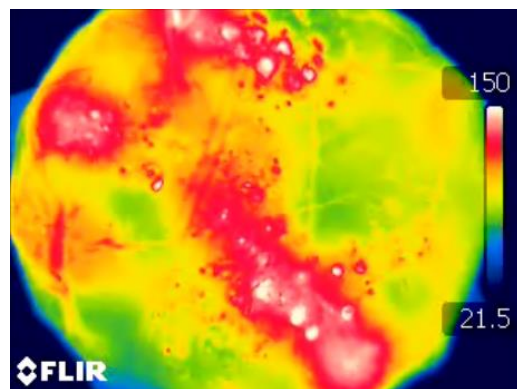
Parametry procesu

Vstupní teplota	19.2 °C
Hmotnost vzorku	1962 g
Použitý výkon	cca 1400 W
Cyklus ohřevu	2 minuty

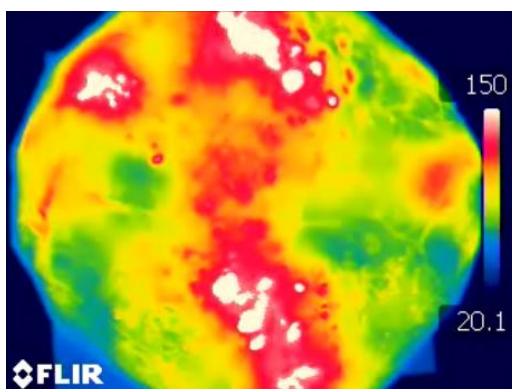
Vzorek kaučuku byl vystaven vlivu mikrovln po dobu osmi minut. Během této doby se, díky termovizní kameře, ve vzorku prokázala přítomnost horkých zón. S každým dalším cyklem se zóny rozrůstaly, docházelo k nárůstu počtu lokací.



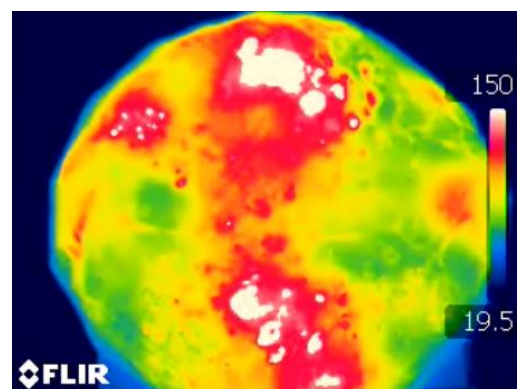
Obr. 33a) po 2 minutách



Obr. 33b) po 4 minutách



Obr. 33c) po 6 minutách



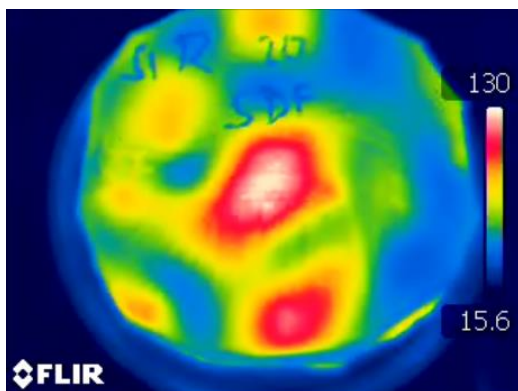
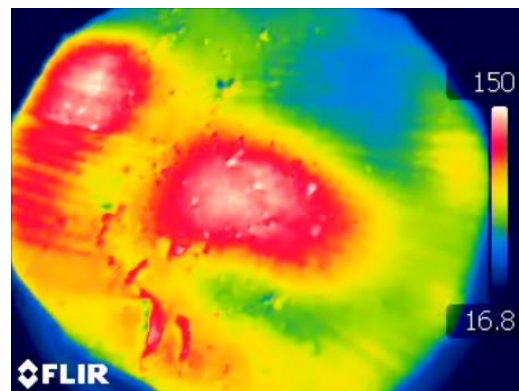
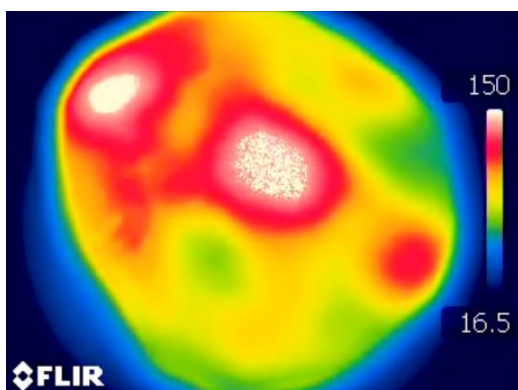
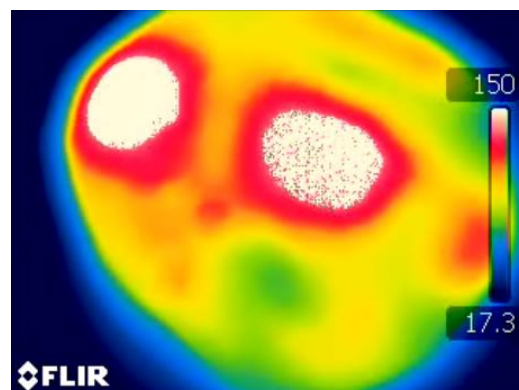
Obr. 33d) po 8 minutách

Obr. 33 Vývoj testu u SIR 20 CV/BP 1

14.1.2 Test č. 2 : PK – SIR 20 SDE**Parametry procesu**

Vstupní teplota	19.8 °C
Hmotnost vzorku	2864 g
Použitý výkon	cca 1400 W
Cyklus ohřevu	5 minut

Po předešlém testu bylo nutné ověřovat správnost měření druhým měřidlem. Jako kontrolní měřidlo byl použit vpichový digitální teploměr. Při jeho použití se zjistilo, že u termovizní kamery nebyl správně nastaven měřící rozsah. Tento byl přenastaven před následujícím testem.

*Obr. 34a) po 5 minutách**Obr. 34b) po 10 minutách**Obr. 34c) po 15 minutách**Obr. 34d) po 20 minutách*



Obr. 34e) po 20 minutách

Obr. 34 Vývoj testu u SIR 20 SDE

Výsledky měření vpichovým teploměrem:

Obr. 34a : 135 °C

Obr. 34b : 167 °C

Obr. 34c : 175 °C

Obr. 34d,e: 237 °C

Z Obr.34e) je patrné, že teplota přesahující 230 °C již vyvolává uvolňování kouře z vnitřního prostoru vzorku. V místech, kde k uvolňování kouře docházelo, byla naměřena teplota až 237 °C.

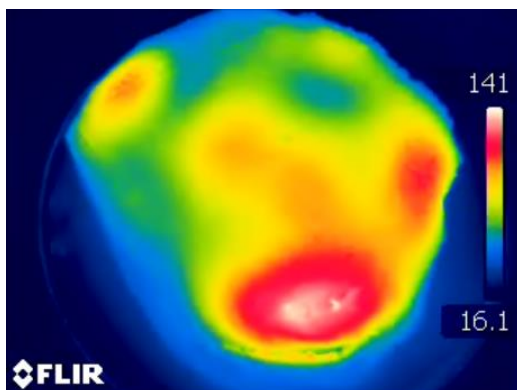
Teploty se pohybovaly vysoko nad 150 °C, což byla nejvyšší naměřená hodnota termovizní kamerou. Z tohoto důvodu byla provedena revize teplotního rozsahu snímání kamery.

14.1.3 Test č. 3 : PK – SMR 10/ MR 9

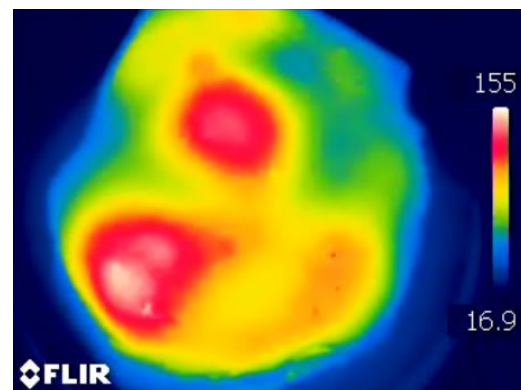
Parametry procesu

Vstupní teplota	19.7 °C
Hmotnost vzorku	1976 g
Použitý výkon	cca 1400 W
Cyklus ohřevu	5 minut

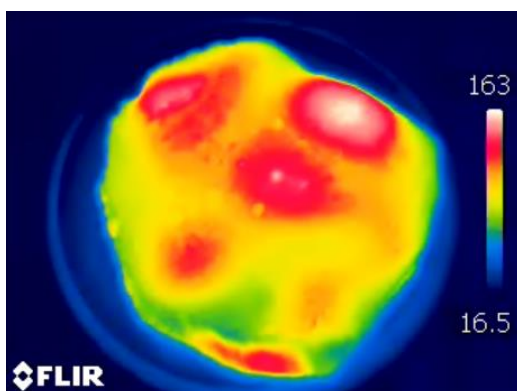
Při tomto testu již bylo nastavení teplotního rozsahu termovizní kamery v pořádku. Bylo zajímavé sledovat, jakým způsobem docházelo k nárůstu teploty a to zejména ve vnitřní části vzorku, který byl měřen vpichovým digitálním teploměrem.



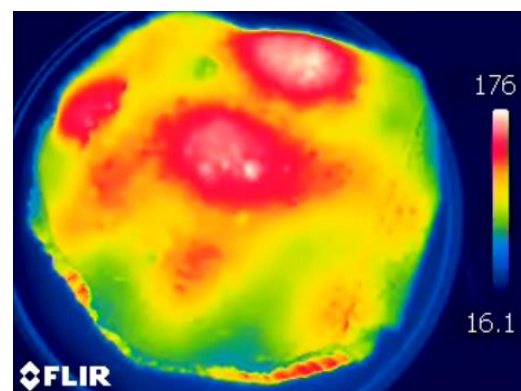
Obr. 35a) po 5 minutách



Obr. 35b) po 10 minutách



Obr. 35c) po 15 minutách



Obr. 35d) po 20 minutách

Obr. 35 Vývoj testu u SMR 10/MR9

Výsledky měření vpichovým teploměrem:

Obr. 35a) : 121 °C

Obr. 35b) : 165 °C

Obr. 35c) : 172 °C

Obr. 35d) : 215 °C

I tento test prokázal tvorbu horkých zón, jak je vidět na snímcích z termovizní kamery. Na rozdíl od předchozích testů, se při této zkoušce projevil nečekaný úkaz v podobě migrující olejovité látky na povrchu testovaného vzorku, a to zejména v místech s vysokou teplotou (hot – spots). Tato látka měla při měření daleko vyšší teplotu, jak samotný kaučuk. Při zpracování surového přírodního kaučuku se do něj přidávají podobné látky, které zajišťují jeho trvanlivost a snazší následné zpracování. Tento jev by mohl být v konečném důsledku jedním z možných vysvětlení vzniku požárů mikrovlnných komor pro předehřev přírodního kaučuku. Vzorky této látky byly odebrány a poslány na chemickou analýzu.



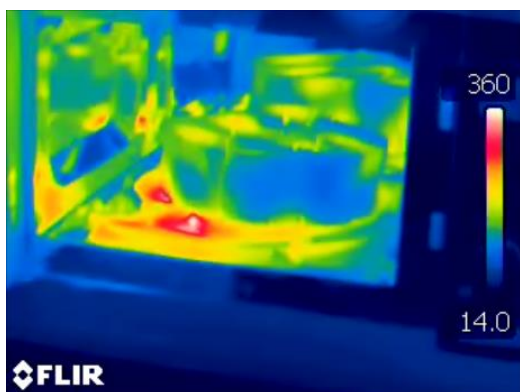
Obr. 36 Migrace olejovité látky u SMR 10/MR9

14.1.4 Test č. 4 : PK – RSS – 3

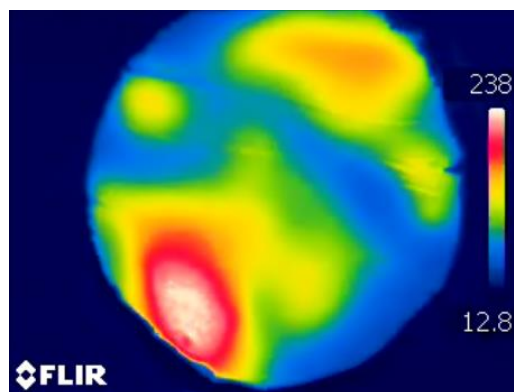
Parametry procesu

Vstupní teplota	19.8 °C
Hmotnost vzorku	2138 g
Použitý výkon	cca 1400 W
Cyklus ohřevu	5 minut

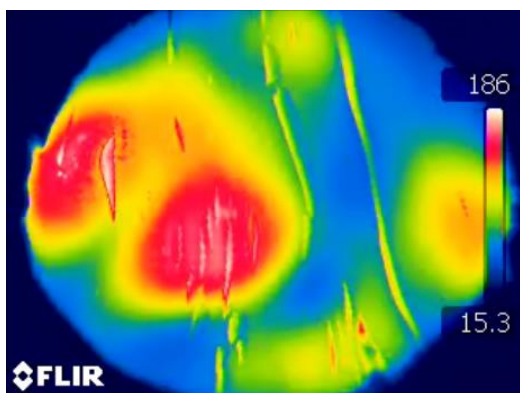
Při testu s tímto druhem přírodního kaučuku došlo k podobnému vyloučení olejovité látky na povrch vzorku, avšak nárůst teploty při tomto pokusu byl enormně rychlý. Po pěti minutách ohřevu došlo dokonce k prasknutí skleněného unášče v mikrovlnné komoře a zahoření kaučuku. Ihned po kolizi byl proveden náměr teploty viz. Obr. 37a). Pro pokračování testu musel být vzorek kaučuku očištěn od vytékajícího oleje.



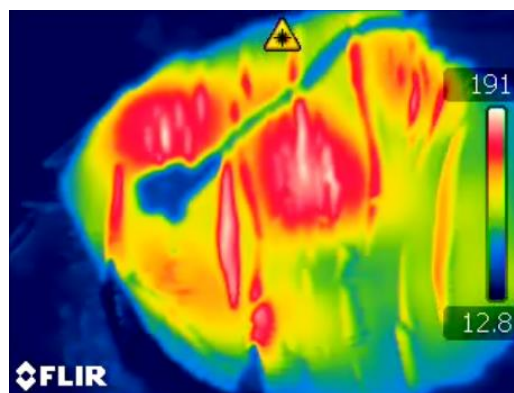
Obr. 37a) po 5 minutách



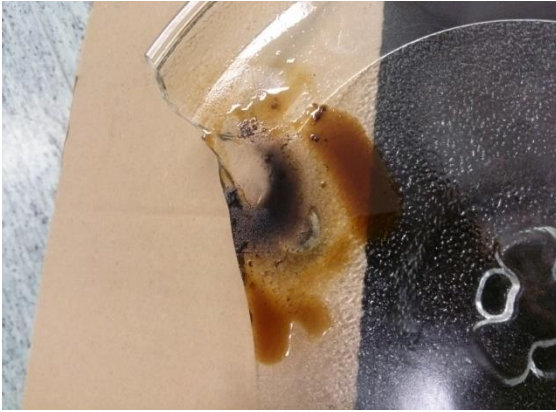
Obr. 37b) po 5 minutách



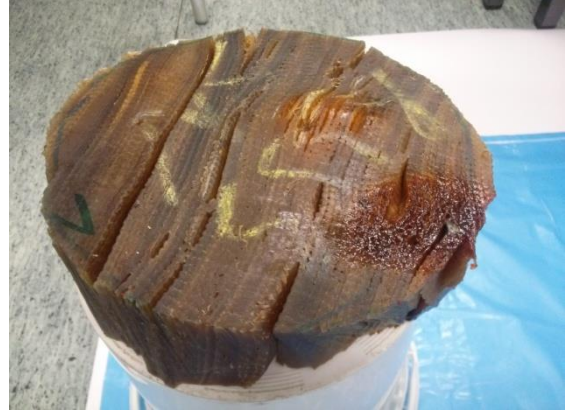
Obr. 37c) po 10 minutách



Obr. 37d) po 15 minutách



Obr. 37e) po 5 minutách



Obr. 37f) po 5 minutách



Obr. 37g) po 5 minutách

Obr. 37 Vývoj testu u RSS -3

Výsledky měření vpichovým teploměrem:

Obr. 37a) : Neměřeno

Obr. 37b) : 145 °C

Obr. 37c) : 177 °C

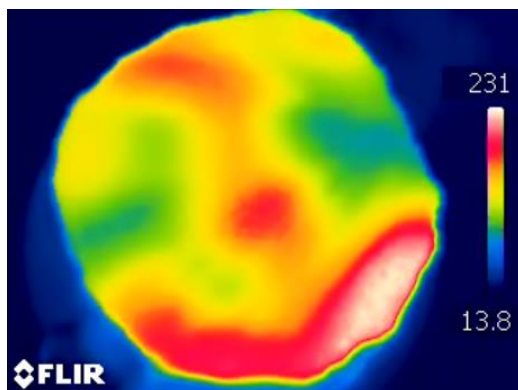
Obr. 37d) : 205 °C

14.1.5 Test č. 5 : PK – SIR 20 SED

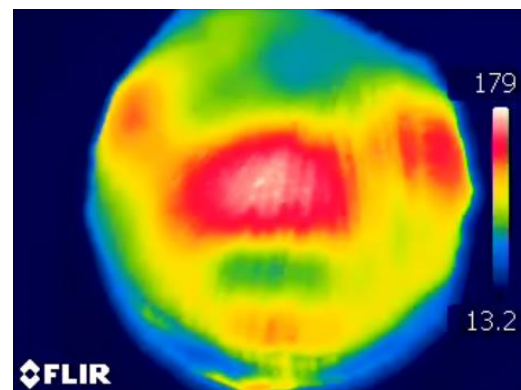
Parametry procesu

Vstupní teplota	19.5 °C
Hmotnost vzorku	2289 g
Použitý výkon	cca 1400 W
Cyklus ohřevu	5 minut

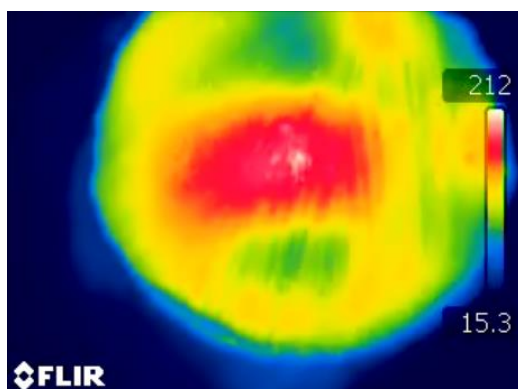
Testování tohoto druhu kaučuku bylo, z hlediska množství vyloučené olejovité látky, velmi významné. Jedná se totiž o jeden z nejvíce používaných přírodních kaučuků vůbec. Při tomto testu opět došlo k masivnímu výtoku oleje a k následnému zahoření této látky.



Obr. 38a) po 5 minutách



Obr. 38b) po 10 minutách



Obr. 38a) po 15 minutách



Obr. 38d) po 5 minutách

Obr. 38 Vývoj testu u SIR 20 SED



Obr. 39 Zahoření oleje po 5 minutách ohřevu



Obr. 40 Ohořelý olej ze SIR 20 SED

Výsledky měření vpichovým teploměrem:

Obr. 37a) : 147 °C

Obr. 37b) : 184 °C

Obr. 37c) : 217 °C

DISKUZE

Z pohledu moderního podniku je DE přehřev materiálů, pro následné zpracování, velmi zajímavou technologií. Její nesporná pozitiva jsou důvodem ke stále častějšímu využití v různých oblastech průmyslu vyspělých zemí. Zařízení, která se k těmto účelům používají, prošla od doby jejich vzniku řadou inovací a vylepšení. Dalo by se s nadsázkou říci, že v dnešní době není možné, aby bylo vyrobeno a také schváleno zařízení, které by nějakým způsobem mohlo ohrozit zdraví, či dokonce životy obsluhujících pracovníků, nebo zavinit rozsáhlé škody na majetku. I přes veškerou snahu vývojových pracovníků, konstruktérů a v neposlední řadě také samotných uživatelů dochází k čas od času k situacím, kdy riziko spojené s výrobním procesem přeroste v reálné nebezpečí, v jistých případech v katastrofu. Základním faktorem, který ovlivňuje vývoj krizových situací spojených s průmyslovou výrobou, je především neznalost všech aspektů, které do procesů zasahují. Mnohdy jsou tyto aspekty skryty a nejsou odhaleny ani při nejrůznějších testech a projevují se až za příslušného provozu zařízení.

Podobně tomu může být i v případě mikrovlnného ohřevu přírodního kaučuku, kterým se zabývá tato Bakalářská práce. Důvodem zvolení tohoto tématu byla snaha zjistit podmínky bezpečného provozu DE technologie v gumárenských provozech. Jak je známo, právě v takových provozech vznik požáru znamená nepředstavitelné nebezpečí z důvodu vysoké hořlavosti používaných surovin.

Cílem této práce bylo zjištění kritických podmínek při provozu mikrovlnného zařízení používaného k ohřevu přírodního kaučuku. Jedná se o kritické podmínky, které spouští, či umožňují vznik požáru. Byly provedeny testy s daným materiálem, při kterých se zkoumal vliv mikrovlnného záření na zpracovávaný materiál. Při pracovních testech došlo k zásadnímu zvratu, kdy se projevil doposud neznámý aspekt, zdůvodňující možný vznik požáru. Ze zkoumaných vzorků kaučuku se, po relativně krátké době aplikace mikrovlnného záření, začala uvolňovat jistá olejovitá tekutina, která při, obecně vzato, nízkých teplotách, začala vykazovat známky hoření. Primárním důvodem uvolňování této látky z kaučukových vzorků byl vznik horkých zón, neboli Hot – spots. Tyto zóny vznikají v důsledku nehomogenity elektromagnetického pole uvnitř komory DE zařízení. Je pravdou, že toto je částečně ošetřeno aplikovaným pohybovým mechanismem, který jistou homogenitu pole zajišťuje, avšak i přes toto opatření ke vniknutí horkých zón dochází.

V laboratorních podmínkách, s předem připraveným technickým zabezpečením pro hašení požáru, nehrozilo při testování žádné vážnější nebezpečí. Ve výrobních provozech však nebezpečí vzniku požáru reálně hrozí, a to dosti vysoké. Mnohé podniky se již na vlastní oči o tomto přesvědčily. Došlo k velkým škodám, které vyřadily výrobní zařízení na dlouhou dobu z provozu.

EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vybudování zařízení pro DE ohřev materiálů v průmyslovém měřítku není jistě laciná záležitost. Náklady na mikrovlnnou komoru standardních rozměrů a výkonu se pohybují v řádu milionů korun. Firma, která se rozhodne investovat takové prostředky, určitě předpokládá, jejich zhodnocení. Tím spíše by mělo být takové zařízení chráněno proti nežádoucím vlivům, které se mohou vyskytnout.

Zabezpečení jakékoliv výrobní linky proti možnému požáru je investicí, která se z dlouhodobého hlediska jistě vyplatí.

ZÁVĚR

Vzhledem k rozsáhlosti této problematiky, nebylo možné obsáhnout veškeré aspekty vzniku požáru při provozu průmyslových DE zařízení. Doufám však, že zjištěním nové skutečnosti, což migrace tekutých, hořlavých látek z přírodního kaučuku jistě je, přispěje ke zvýšení pozornosti při zpracovávání, a tím také k zajištění vyšší bezpečnosti DE zařízení.

Způsobů, jak chránit a zabezpečovat provoz mikrovlnné komory je hned několik. Na linku lze nainstalovat nejrůznější snímače, a to jak teplotní, tak i kouřové, které jsou schopny včas detekovat hrozící nebezpečí. Jedna z možností je také montáž integrovaného protipožárního systému, který funguje na bázi inertních plynů, či jejich směsi. Tento je schopen zajistit uhašení případného požáru ve velmi krátké době díky rychlému snížení koncentrace kyslíku v chráněné zóně. Lze také s úspěchem použít kapalný dusík, který zajistí rapidní ochlazení prostředí a po přechodu do plynné fáze plní funkci inertního plynu. Tímto je možné chránit zařízení před důsledky požáru. Nešetrné hašení totiž může způsobit, v konečném důsledku, daleko větší škody, než samotný požár.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Dostupný z http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty
- [2] Vintr, Josef. *Konstrukční řešení násobného vlnovodu mikrovlnné komory.* (Diplomová práce) Univerzita Tomáše Bati 2009
- [3] Kejnar, Zdeněk. *Ohřev kaučuku mikrovlnnou (MW) technologií.* (Bakalářská práce) Univerzita Tomáše Bati 2007
- [4] BIOLEK, Michal. *Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky.* (Diplomová práce) Univerzita Tomáše Bati 2006
- [5] Hájek, Milan. *Mikrovlny v akci.* Ústav chemických procesů AV ČR
- [6] *Elektronová mikroskopie pro biology: Mikrovlny v přípravě preparátů pro TEM* [online]. 2005 [cit. 2008-1-20]. Dostupný z WWW:<<http://www.paru.cas.cz/>>
- [7] VRBA, J. *Úvod do mikrovlnné techniky.* Vydavatelství ČVUT, 2000, 235 s, ISBN 80-01-02112-2.
- [8] Křůmal, Martin. *Laboratorní zařízení pro dielektrický ohřev kaučuku* (Diplomová práce) Univerzita Tomáše Bati 2009
- [9] Dostupný z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/>
- [10] Sedlák, Jakub. *Zinečnatá plniva s polymerním potahem.* (Diplomová práce) Univerzita Tomáše Bati 2010
- [11] Dostupný z:<http://www.technicke-normy-csn.cz/833001-csn-e-ison>
- [12] Dostupný:http://www.hasicivzdelavani.cz/download/bravansky/pdf/hasebni_latky-inertni_plyny
- [13] Poznatky a zápisy z přednášek předmětu: *Procesní inženýrství II.*

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

P - energie absorbovaná v jednotce objemu (W/m^3),

f - frekvence mikrovlnného pole (2450 MHz),

ϵ' - permitivita vakua, ($8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$),

ϵ'' - imaginární část komplexní relativní permitivity,

E - intenzita elektrického pole uvnitř materiálu (V/m),

V - objem materiálu (m^3)

PD - penetrační hloubka (m)

λ_0 - vlnová délka ve vakuu (m)

$P_{stř}$ - střední výkon (W)

P_0 - příkon (W)

Q - teplo (J)

η - účinnost (%)

ΔT - změna teploty ($^{\circ}C$)

m - hmotnost (kg)

t - čas (s)

K - tepelná kapacita měřícího válečku ($J \cdot K^{-1}$)

S - plocha vzorku (m^2)

λ - tepelná vodivost ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

t - snímaná teplota měřícího válečku ($^{\circ}C$)

t_1 - teplota temperované desky ($^{\circ}C$)

t_2 - počáteční teplota měřícího válečku ($^{\circ}C$)

δ - tloušťka vzorku (m)

B - koeficient tepelných ztrát ($J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)

C_p - střední měrné teplo při konstantním tlaku ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

ρ - hustota (kg/m^3)

a – teplotní vodivost (m^2/s)

α - je koeficient přestupu tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

S_z - plocha, na níž dochází ke ztrátám (m^2)

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Porovnání efektivity použitých typů ohřevu na různých druzích kaučuku*
- Obr. 2 Mikrovlnná komora Continental Barum s r.o.*
- Obr. 3 Mikrovlnná komora Continental Barum s r.o.*
- Obr. 4 Mikrovlnná komora Continental Barum s r.o.*
- Obr. 5 Mikrovlnná sklářská pec*
- Obr. 6 Porovnání DE a konvenčního ohřevu*
- Obr. 7 Schéma mikrovlnné trouby*
- Obr. 8 Působení elektromagnetického vlnění na různé druhy materiálů*
- Obr. 9 Oblasti spektra elektromagnetického záření*
- Obr. 10 Konstrukce magnetronu*
- Obr. 11 Magnetron značky LG o výkonu 1,1 kW a frekvenci 2,45 GHz.*
- Obr. 12 Konvenční způsob ohřevu liquid materiálů – vyhřívací komora*
- Obr. 13 Konstrukce klikového mechanismu dopravníku v mikrovlnném poli.*
- Obr. 14 Průběh vzniku „hot spots“ při DE ohřevu syntetického kaučuku*
- Obr. 15 Mikrovlnná komora Continental Barum s.r.o. -následky požáru.*
- Obr. 16 Tandemové laboratorní mikrovlnné zařízení*
- Obr. 17 Digitální vpichový teploměr*
- Obr. 18 Laboratorní lis*
- Obr. 19 Výpočetní a programové vybavení*
- Obr. 20 Výpočetní a programové vybavení*
- Obr. 21 Výpočetní a programové vybavení*
- Obr. 22 Snímání prostupu tepla*
- Obr. 23 Termovizní kamera FLIR T 335*
- Obr. 24 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na výkonu interního zařízení*
- Obr. 25 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na výkonu externího zařízení*

- Obr. 26 Grafické vyjádření závislosti teploty vzorku na společném výkonu
- Obr. 27 Mapa pozic měření teploty
- Obr. 28 Grafické znázornění nárůstu teploty přírodního kaučuku
- Obr. 29 Schéma měřicího zařízení teplotní vodivosti
- Obr. 30 Vzorky přírodních kaučuků
- Obr. 31 Výlisky vzorků
- Obr. 32 Grafické znázornění měření tepelné vodivosti u SMR 10/MR9
- Obr. 33 Vývoj testu u SIR 20 CV/BP 1
- Obr. 34 Vývoj testu u SIR 20 SDE
- Obr. 35 Vývoj testu u SMR 10/MR9
- Obr. 36 Migrace olejovité látky u SMR 10/MR9
- Obr. 37 Vývoj testu u RSS – 3
- Obr. 38 Vývoj testu u SIR 20 SED
- Obr. 39 Zahoření oleje po 5 minutách ohřevu
- Obr. 40 Ohořelý olej ze SIR 20 SED

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i>	<i>Penetrační hloubka mikrovln v různých materiálech</i>
<i>Tab. 2</i>	<i>Zátěžový test interního zdroje – náměry teploty (°C)</i>
<i>Tab. 3</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 20% výkonu</i>
<i>Tab. 4</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 40% výkonu</i>
<i>Tab. 5</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 60% výkonu</i>
<i>Tab. 6</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 80% výkonu</i>
<i>Tab. 7</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 100% výkonu</i>
<i>Tab. 8</i>	<i>Zátěžový test externího zdroje – náměry teploty (°C)</i>
<i>Tab. 9</i>	<i>Účinnost externího zdroje při 100% výkonu</i>
<i>Tab. 10</i>	<i>Zátěžový test interního a externího zdroje – náměry teploty (°C)</i>
<i>Tab. 11</i>	<i>Účinnost obou zdrojů dohromady při 100% výkonu</i>
<i>Tab. 12</i>	<i>Test ohřevu přírodního kaučuku</i>
<i>Tab. 13</i>	<i>Účinnost interního zdroje při 60% výkonu</i>
<i>Tab. 14</i>	<i>Tloušťka vzorků PK</i>
<i>Tab. 15</i>	<i>Výsledné koeficienty tepelných ztrát</i>
<i>Tab. 16</i>	<i>Výsledky tepelné vodivosti u PK</i>
<i>Tab. 17</i>	<i>Výsledky teplotní vodivosti u PK</i>