

# Úprava receptury směsi pro výrobu pěny z polyethylenu za účelem snížení hořlavosti

Bc. Miroslav Palich

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Palich**

Osobní číslo: **T14330**

Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Inženýrství polymerů**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Úprava receptury směsi pro výrobu pěny z polyetylenu za účelem snížení hořlavosti**

Zásady pro vypracování:

- Vypracování literární rešerše na zadané téma
- Příprava směsí s/bez retardéru hoření
- Charakterizace připravených směsí pomocí vybraných metod (zkouška hořlavosti, FTIR, DSC, optický mikroskop, atd.)
- Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Ash M. and Ash I. (2013) Handbook of Plastics and Rubber Additives, Volumes 1-2 (2nd Edition). Synapse Information Resources, Inc.

Dodiuk H. and Goodman, S.H. (2014) Handbook of Thermoset Plastics (3rd Edition). Elsevier.

Goodman S.H. (1998). Handbook of Thermoset Plastics (2nd Edition). William Andrew Publishing/Noyes.

Landrock A.H. (1995). Handbook of Plastic Foams. William Andrew Publishing/Noyes

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Stěnička, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

**15. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. května 2016**

Ve Zlíně dne 1. března 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## 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 obhajoby <sup>1)</sup>;
- 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. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 § 60 <sup>3)</sup> 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 .....

.....

---

<sup>1)</sup> 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 nevydělečně 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.

<sup>2)</sup> 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, užije-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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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**

Předpokládaná studie se zabývá úpravou receptury na výrobu pěny z nízkohustotního polyethylenu za účelem snížení její hořlavosti. Na základě provedené literární rešerše byly vybrány vhodné a komerčně dostupné retardéry hoření na bázi halogenů. Jejich charakterizace byla provedena pomocí vhodných metod, jmenovitě termogravimetrické analýzy, rentgenové fluorescence, diferenční snímací kalorimetrie a infračervené spektroskopie.

U vytlačených zkušebních vzorků pak byly srovnány změny v rozměrech a struktuře pěny v závislosti na typu a obsahu retardéru hoření ve směsi. Hlavní část experimentální práce byla věnována zkouškám hořlavosti, které byly provedeny podle normy ČSN EN ISO 11 925-2. Z dosažených výsledků je patrné, že přídavek retardérů do směsi měl výrazný vliv na snížení jejich hořlavosti.

Klíčová slova: pěna, nízkohustotní polyethylen, hořlavost, retardéry hoření

## **ABSTRACT**

The presented study deals with the modification of system composition of polymer mixture for low density polyethylene foam to reduce its combustibility. Based on the literature search, suitable and commercially available halogen based flame retardants were selected. Their characterization was carried out using suitable methods, namely a thermogravimetric analysis, X-ray fluorescence, differential scanning calorimetry and infrared spectroscopy.

The changes in the dimensions and structure of the foam as the dependence on the type and concentration of the flame retardant in mixture were compared by tested specimens. The main part of the experimental work was focused on combustibility tests which were carried out according to CSN EN ISO 11 925-2. As obtained results showed that the addition of flame retardants into the polymer mixtures had a significant effect in reduction of their combustibility.

Keywords: Foam, low density polyethylene, combustibility, flame retardants

Za odborné vedení, cenné připomínky, návrhy a pomoc při měření při vypracování této diplomové práce bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu diplomové práce Martinovi Stěničkovi, dále bych chtěl poděkovat Ondřeji Křejímu, Gabriele Jandíkové a Pavlovi Kucharczykovi za pomoc při měření. Poděkování patří i firmě i Spur a.s., za poskytnuté materiály a především Ondřeji Krátkému a Janu Musilovi. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 30.5.2016

.....

Podpis studenta

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 PROCES VYTLAČOVÁNÍ PĚN.....</b>	<b>12</b>
1.1 POPIS VÝROBY.....	12
1.2 DALŠÍ SOUČÁSTI LINKY.....	15
<b>2 PRINCIPY LEHČENÍ.....</b>	<b>16</b>
2.1 FYZIKÁLNÍ NADOUVADLA.....	16
2.2 CHEMICKÁ NADOUVADLA.....	19
2.3 NUKLEACE PĚNY.....	20
2.4 VLIV TEPLoty NA PĚNĚNÍ.....	22
2.5 ROZDĚLENÍ PĚN.....	23
<b>3 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY S DŮRAZEM NA POLYETHYLEN.....</b>	<b>25</b>
3.1 POLYETHYLEN.....	25
3.1.1 Výroba LDPE.....	27
3.1.2 Výroba HDPE, LLDPE.....	28
3.1.3 Vlastnosti a použití polyethylenu.....	29
<b>4 HOŘLAVOST A RETARDÉRY.....</b>	<b>30</b>
4.1 ZÁKLADNÍ POJMY HOŘLAVOSTI.....	30
4.2 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	31
4.2.1 Rozdělení podle způsobu retardace.....	31
4.2.2 Rozdělení podle začlenění do polymerní matrice.....	32
4.2.3 Rozdělení dle chemického složení.....	32
4.2.3.1 Retardéry obsahující halogen.....	33
4.2.3.2 Retardéry obsahující fosfor.....	34
4.2.3.3 Retardéry obsahující křemík.....	35
4.2.3.4 Ostatní retardéry hoření.....	36
<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>39</b>
<b>5 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....</b>	<b>40</b>
<b>6 CHARAKTERIZACE VZORKŮ RETARDÉRŮ HOŘENÍ.....</b>	<b>44</b>
6.1 RENTGENOVÁ FLUORESCENCE.....	44
6.2 DIFERENČNÍ SNÍMACÍ KALORIMETRIE.....	45
6.3 TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA.....	47
6.4 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE.....	50
<b>7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>51</b>
7.1 MĚŘENÍ VELIKOSTI CEL.....	51
7.2 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ A OBJEMOVÉ HMOTNOSTI.....	53
7.3 MĚŘENÍ HOŘLAVOSTI VZORKŮ.....	56
7.3.1 Měření dle normy ČSN EN ISO 11 925-2.....	58
7.3.2 Měření dle normy UL94HB.....	60
7.3.3 Měření dle normy UL94V.....	63
<b>8 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>73</b>



<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>76</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>81</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>82</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>84</b>

## ÚVOD

Pěnové materiály na polymerní bázi se v posledních desetiletích staly zajímavým artiklem z pohledu průmyslových aplikací, a to zejména v oblasti stavebnictví či obalové techniky, kde postupně nahrazují, díky svým užitným vlastnostem, tradiční materiály. Z běžných materiálů se na výrobu pěn nejčastěji používají polyethylen, polystyren, anebo polyuretan.

V rámci této studie byla pozornost zaměřena na výrobu pěny z nízkohustotního polyethylenu (LDPE). Oproti jiným polymerům má LDPE výhodu především v relativně jednoduché zpěnitelnosti i například pomocí technologie vytlačování, kdy se do polymerní směsi přidává fyzikální nadouvadlo, které po opuštění vytlačovacího stroje způsobuje nalehčení. Dalším benefitem je pak možnost uplatnění v širokém rozsahu aplikací, poměrně snadná recyklace použitých pěn, anebo jen výrobní či zpracovatelské náklady.

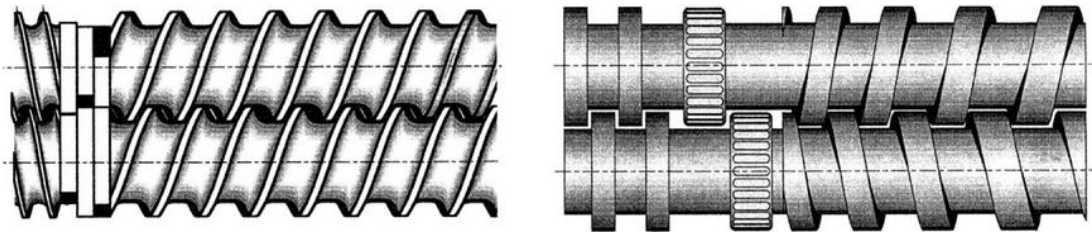
Tím, jak se postupně rozšiřují uvažované aplikace, tak rostou i nároky na užité vlastnosti LDPE pěn. Jedním z kritických parametrů jejich použitelnosti např. ve stavebnictví je pak jejich odolnost proti hoření. Polyethyleny se, jak známo, obecně řadí mezi snadno hořlavé polymerní materiály, což v kombinaci se specifickou strukturou pěn, která ještě více podporuje jejich hoření, je výrazně omezujícím faktorem.

Proto je tady snaha dosáhnout zvýšení odolnosti LDPE proti hoření. To bylo i cílem předkládané studie, kdy na základě provedené literární rešerše byly vybrány vhodné a komerčně dostupné retardéry hoření. Retardéry byly v různých koncentracích přidány do standardní receptury a byly z nich připraveny zkušební vzorky, na kterých byly provedeny zkoušky hořlavosti podle příslušné normy.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 PROCES VYTLAČOVÁNÍ PĚN

Technologie vytlačování je kontinuální proces a výrobní zařízení se nazývá extrudér. Protože se u vytlačování pěny neboli lehčeného materiálu používá nadouvací, je velmi důležité důkladné promíchání polymerní taveniny společně s lehčícím plynem. Z tohoto důvodu jsou nejpoužívanějším typem extrudéru dvojšneky, právě pro jejich výbornou míchací schopnost. Mezi hlavní typy dvojšneků se vzájemným záběrem, které se nejvíce používají ke zpracování materiálu, jsou souběžné – oba šneky se točí na jednu stranu a protiběžné – šneky se otáčejí proti sobě. Oba typy jsou znázorněny na obrázku 1. [1,2]



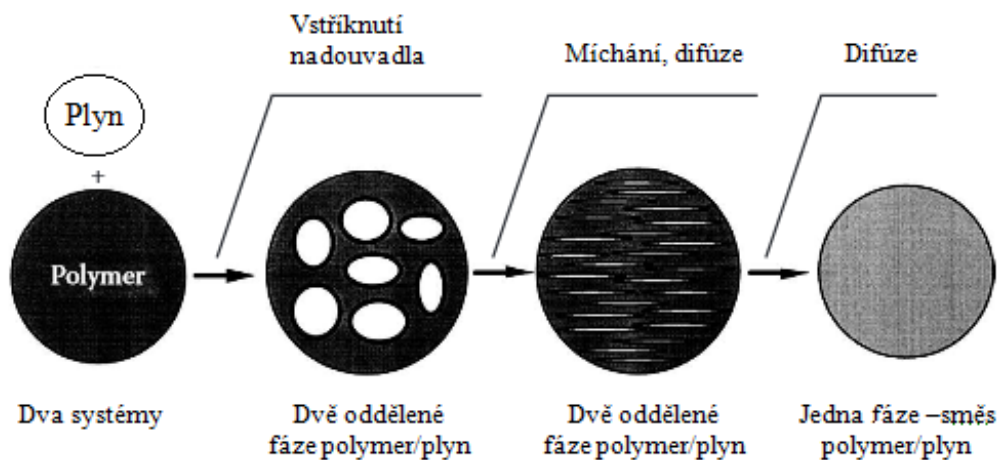
Obr. 1: Schéma souběžných šneků (vlevo) a protiběžných (vpravo) [1]

Za jejich nevýhodu lze považovat to, že jsou v porovnání s jednošneky dražší a mají výbornou dopravní schopnost. Z tohoto důvodu se musí používat drahé dávkovací zařízení (feedery), jinak by mohlo dojít k zahlcení šneků, právě vlivem jejich vysokého dopravního výkonu. Použití gravimetrických feederů zajistí, aby se dodrželo konstantní dávkování směsi, a nedochází k výkyvům dávkování a tedy změnám objemové hmotnosti pěny. Velmi často se používá pouze jeden feeder na celou směs, která se míchá v jiné části. K navažování směsi slouží navažovací zařízení, které naváží komponenty směsi v přesně daném poměru a tam se také zhomogenizuje, tedy zamíchá a celá směs je dopravena do gravimetrického feederu umístěného nad vstupem do šneků. [1,2]

### 1.1 Popis výroby

V první fázi je proces vytlačování pěn stejný jako klasická extruze. Z dávkovacího zařízení směs vstupuje do vstupní části šneku, kde dochází ke zhutňování materiálu a jeho dopředného pohybu. V kompresní zóně dochází k tavení na jejím konci také k dávkování nadouvacího plynu – jedná-li se o fyzikální lehčení. Ve

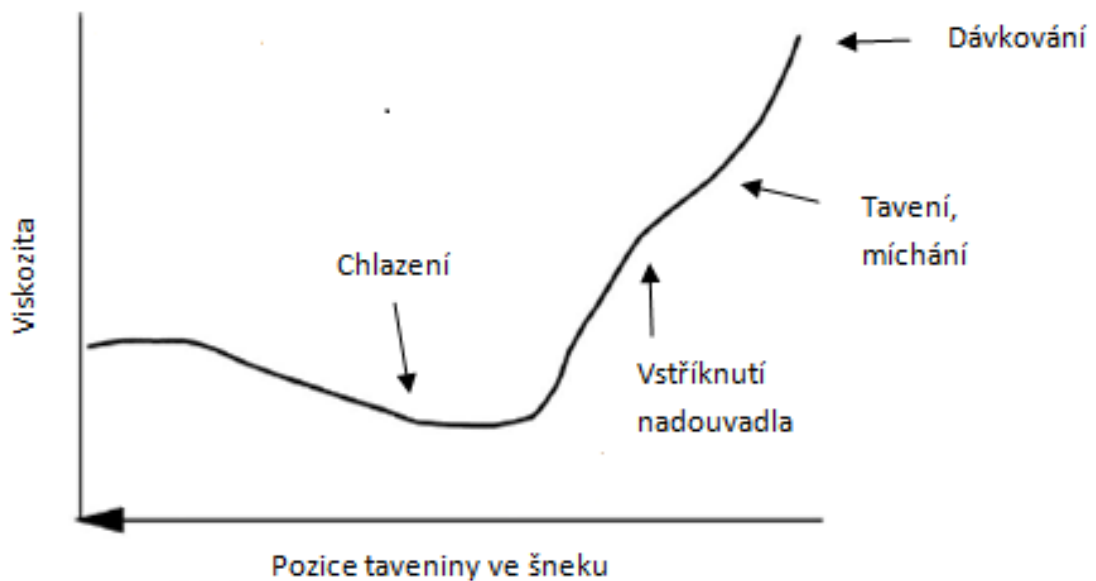
výstupní zóně dochází pomocí míchacích elementů k homogenizaci celé směsi s nadouvacím plynem, jak je vidět na obrázku 2.



Obr. 2: Homogenizace polymerní směsi s nadouvadlem [3]

Poté tavenina, respektive taveninová směs teče přes další části extrudéru, které u klasického vytlačování obvykle chybí. Jedná především o tyto části:

- 1) Screenchanger je část stroje, do které se vkládá lamač, ve kterém jsou umístěny filtrační tkaniny. Jedná se tedy o taveninový filtr pro pevné částice, které brání ucpání štěrbiny ve vytlačovacích nástrojích nebo jiné části extrudéru.
- 2) Chladič taveniny je jedna z nejdůležitějších částí extrudéru, protože procesní okno pro výrobu pěn není příliš široké a je důležité dodržet přesnou teplotu, tedy viskozitu taveniny. Nadouvadlo funguje jako změkčovadlo. Po jeho vstříknutí do taveniny dojde k poklesu viskozity. Je tedy důležité polymerní taveninu chladit, aby se dosáhlo potřebné viskozity, jak ukazuje obrázek 3. Přesnou viskozitu je procesně náročné sledovat, je tedy výhodnější sledovat teplotu, která s viskozitou úzce souvisí. Tento problém bude diskutován v kapitole 2.4 Vliv teploty na pění.



Obr. 3: Závislost viskozity taveniny na poloze ve šneku [1]

- 3) Homogenizátor taveniny nebo-li statický mixér slouží k tomu, že tavenina, která vystupuje z chladiče taveniny a je teplotně nehomogenní se zamíchá a teplotně homogenizuje. Princip homogenizátoru spočívá v tom, že tavenina naráží na soustavu lamel, na kterých se mění rychlostní profil. Ve středu kanálu, kde tavenina bývá nejteplejší a tedy i nejrychlejší je tavenina natlačena na stěny homogenizátoru a pomalejší tavenina ze stěn je tlačena do středu. Tím dochází k homogenizaci taveniny.
- 4) Vytlačovací hlava je poslední součást vytlačovacího stroje. Do kruhové vytlačovací hlavy se montují nástroje – trn a hubice. Na určitý rozměr výrobku se používá kombinace velikostí nástrojů. Vytlačovací hlava, respektive nástroje v ní, tedy udávají konečný rozměr výrobku. Je třeba upozornit, že velikost nástrojů je podstatně menší než velikost hotového výrobku. [1,2,4]

## 1.2 Další součásti linky

Pro stabilní výrobu jsou důležité i části pro uchování polymeru, tedy sila. V silách je materiál v suchu, temnu a při stabilní teplotě. Dalšími důležitými součástmi pro vytlačování jsou především chladicí dráha, odtah a sekačka. V chladicí dráze je potřeba hotovou pěnu ještě ochladit, aby při useknutí na požadovanou délku nedocházelo k defektům seku. Pokud se nepodaří pěnu dostatečně ochladit, může sekačka vytrhnout část ještě horkého materiálu a sek poté vypadá nevzhledně. Jako chladicí médium se používá vodní sprcha nebo vzduch. Protože se jedná především o izolace, je u nich přestup tepla tak malý, že rozdíl mezi těmito médii je při delších časech chlazení téměř zanedbatelný. Konstantní odtah je také velmi důležitý, aby nedocházelo k pulzacím za vytlačovací hlavou a tedy i ke kolísáním rozměrů. Sekačka pouze krátí výrobky na požadovanou délku zákazníkem. [1,2,5]

V procesu fyzikálního lehčení jsou tedy zásadní tyto body:

- 1) Systém dávkování polymerní směsi
- 2) Tavení a dispergace jednotlivých komponent směsi
- 3) Vstřikování nadouvacího plynu a jeho dispergace
- 4) Chlazení taveniny
- 5) Homogenizace taveniny
- 6) Vytlačení hotového výrobku

## 2 PRINCIPY LEHČENÍ

Nadouvadla jsou nedílnou součástí procesu vytlačování pěn. Nadouvadla mohou být ve formě plynů, kapalin nebo pevných látek. Do speciální kategorie se řadí inertní plyny jako oxid uhličitý a dusík, které mohou být vstřikovány přímo, nebo jsou produkty rozkladných reakcí. [6]

První lehčený termoplast se podařilo vyrobit v roce 1935. Jednalo se o lehčený polystyren, který byl nalehčen pomocí kapaliny s nízkou teplotou varu, kterou byl butylen. Celá směs byla dána do velké nádoby, kde se ohřála. Poté byla vystavena atmosférickému tlaku. Vlivem rozdílu tlaků došlo k napěnění polystyrenu. Celý tento proces byl převeden na vytlačování, kdy se nejprve zpracovávaly granule předem napuštěné nadouvadlem a až později byl vyvinut systém přímého vstřikování nadouvadla do extrudéru. [6,7]

### 2.1 Fyzikální nadouvadla

Jako fyzikální nadouvadla se používají především kapaliny, které jsou pod tlakem vstřikovány do taveniny. Aby bylo fyzikální nadouvadlo použitelné, musí splňovat některé předpoklady. Především musí být rozpustné v polymerní tavenině, ale nesmí se rozpouštět v tuhé fázi, nesmí chemicky reagovat s taveninou a jejími složkami, musí být nekorozivní a v neposlední řadě nesmí být nebezpečné pro životní prostředí. V počátcích této technologie bylo používáno více druhů fyzikálních nadouval. Mezi prvními se začaly používat chlorované uhlovodíky jako methylchlorid a chlorofluoroderiváty uhlovodíků známé jako freony, nebo pod anglickou značkou chlorofluorocarbon (CFC). Jejich obrovská výhoda spočívala v tom, že byly nehořlavé a netečné, avšak poměrně drahé. V roce 1987 však byly freony zakázány, protože ničí ozónovou vrstvu atmosféry. Bylo tedy nutné najít za freony vhodnou alternativu.

V dnešní době se používají především nižší alkany, tedy propan, butan a pentan a inertní plyny  $N_2$ ,  $O_2$  a  $CO_2$ . V tabulce 1 je uveden přehled fyzikálních nadouval. Doposud používaná nadouvadla, jsou označena tučně. [7,8]



Tabulka 1: Souhrn fyzikálních nadouvadel [8]

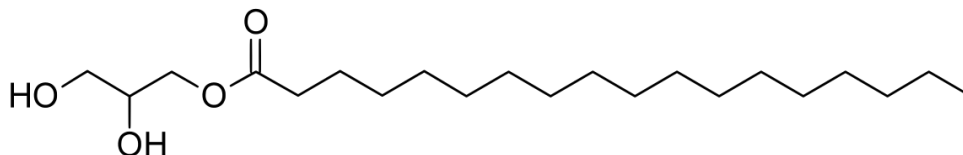
Název	Vzorec	Molekulová hmotnost	Teplota varu (°C)	Tenze par při 20°C (kPa)	Hustota kapaliny (g/cm <sup>3</sup> )	Hořlavost
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1	-42,1	950,7	0,49	Ano
n-Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1	-0,5	243,1	0,57	Ano
i-Butan	CH <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> )CHCH <sub>3</sub>	58,1	-11,7	348,4	0,55	Ano
n-Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,2	36,1	68,3	0,621	Ano
i-Pentan	CH <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> )CHCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	72,2	27	98,1	0,615	Ano
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	44,0	-78,5	-	-	Ne
Dusík	N <sub>2</sub>	28,0	-195,5	-	-	Ne
Kyslík	O <sub>2</sub>	32,0	-183,0	-	-	Ne
HCFC-22	CHF <sub>2</sub> Cl	86,5	-40,8	1043,9	1,194	Ne
HCFC-142b	CF <sub>2</sub> ClCH <sub>3</sub>	100,5	-9,2	338,9	1,11	Ano
HFC-152a	CHF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	66,0	-24,7	598,5	0,899	Ano
HCFC-123	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	153,0	27,1	91,5	1,46	Ne
HCFC-123a	CHFClCF <sub>2</sub> Cl	153,0	28,2	86,9	1,467	Ne
HCFC-124	CHFClCF <sub>3</sub>	136,5	-12,0	385,1	1,356	Ne
HCFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	102,0	-26,5	665,5	1,207	Ne
HCFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	84,0	-46,7	1258,3	1,089	Ano
HCF-11	CFCl <sub>3</sub>	137,4	23,8	105,6	1,476	Ne
HCF-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	120,9	-29,8	651,6	1,311	Ne
HCF-113	CFCl <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> Cl	187,4	47,6	44,5	1,565	Ne
HCF-114	CF <sub>2</sub> ClCF <sub>2</sub> Cl	170,9	3,6	213,4	1,456	Ne
MeCl	CH <sub>3</sub> Cl	50,5	-24,2	566,4	1,098	Ano
MeCl <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	84,9	40,1	56,6	1,322	Ne

Ne každé nadouvadlo je však vhodné pro každý polymer. Je velmi důležité myslet na teplotu varu a tenzi par fyzikálního nadouvadla. Čím vyšší je bod varu nadouvadla,

tím nižší má tenzi par a čím nižší má tenzi par, tím hůře podrží buněčnou strukturu pěny. Např. u extrudovaného polystyrenu se běžně používá jako nadouvadlo n-pentan, které má bod varu 36,1 °C a tenzi par 68,3 kPa. Extrudovaný polystyren má však takovou tuhost, že se jeho buněčná struktura nezhroutí. Pokud by se však n-pentan použil na vytlačování pěny z LDPE, nebo jiného méně tuhého materiálu, celá struktura by se pod vlivem malého vnitřního tlaku zhroutila ihned po vytlačení. Proto se u pěn z LDPE používá n-butan nebo i-butan jako náhrada za již zakázaný freon CFC-114. Je nutné upozornit, že všechny nižší alkyany jsou vysoce hořlavé a proto je pracovat s různými bezpečnostními opatřeními. [7-9]

Celý proces lehčení pak funguje tak, že tavenina je po opuštění extrudéru vystavena atmosférickému tlaku a nadouvadlo přejde z kapalné fáze do plynné, čímž dochází k napěnění polymeru a k vytvoření buněčné struktury. Kritický tlak na hubici poté odpovídá tlaku tenzi par příslušného nadouvadla při teplotě zpracování daného polymeru. Pokud tlak při extruzi klesne pod tento kritický tlak, začne nadouvadlo pěnit uvnitř extrudéru, což je nežádoucí. [7-9]

Další problém spojený s vytlačováním pěn je spojen s rychlým únikem nadouvadla z pěny a pomalým průnikem vzduchu do pěny. I když má tedy nadouvadlo optimální tenzi par, aby podrželo buněčnou strukturu, může z pěny velmi rychle uniknout a stejně dojde ke zborcení struktury vlivem nižšího tlaku uvnitř buňky. Z tohoto důvodu se používají další aditiva zabraňující rychlému úniku nadouvadla z pěny označované jako modifikátory permeace. Jako nejběžněji používaný modifikátor permeace se používá glycerol-monostearát (GMS), jehož molekula je zobrazena na obrázku 4 anebo jiné estery vyšších kyselin. [7-9]



Obr. 4: *Strukturní vzorec molekuly GMS* [10]

## 2.2 Chemická nadouvadla

Plyny, které vznikají při rozkladných reakcích, fungují stejně jako fyzikální nadouvadla jako změkčovadlo a je proto nutné polymerní taveninu chladit na požadovanou teplotu [9].

Na rozdíl od fyzikálních nadouvadél, která jsou v kapalně fázi, jsou chemická nadouvadla většinou pevné částice, ve formě masterbatche, které se přidávají do polymerní směsi a dávkuje se do extrudéru přes gravimetrický feeder v přesném poměru. Jedná o látky, které se za určitých podmínek rozkládají a generují plynnou složku. Většina chemických nadouvadél se rozkládá v teplotním intervalu, který by se měl nacházet blízko teploty zpracování daného polymeru. Vhodný výběr chemického nadouvadla zajistí, že se rozloží všechny molekuly a že se některé nebudou rozkládat předčasně, nebo že se některé nerozloží vůbec. [8,9]

Při rozkladu chemických nadouvadél vznikají pevné částice. Tento pevný zbytek slouží jako nukleační činidlo. Velmi důležitá je vhodná volba teplotního profilu na šnečích extrudéru, protože pokud se začne nadouvadlo rozkládat ještě před rozpuštěním polymeru, může vzniklý plyn uniknout ven přes násypku a nedojde tedy k jeho rozpuštění v tavenině. [8,9]

Chemická nadouvadla můžeme rozdělit na dva typy, a to endotermické, které se rozkládají při dodání tepla a exotermické, u kterých se teplo uvolňuje. Důležité je, že jakmile se začne rozkládat chemické nadouvadlo exotermního typu, je velmi obtížné zastavit proces rozkladu v průběhu. Na druhé straně endotermní nadouvadla vyžadují dodávání tepla v celém průběhu jejich rozkladu, což má za následek, že se rozkládají v delším časovém intervalu a zastavení jejich rozkladu není nijak náročné. Dalším velkým rozdílem je také to, že endotermické typy vytváří jako hlavní pěnící plyn oxid uhličitý a exotermní dusík. Přehled používaných chemických nadouvadél je uveden v tabulce 2. [8,9]

Tabulka 2: Souhrn chemických nadouvadél [8]

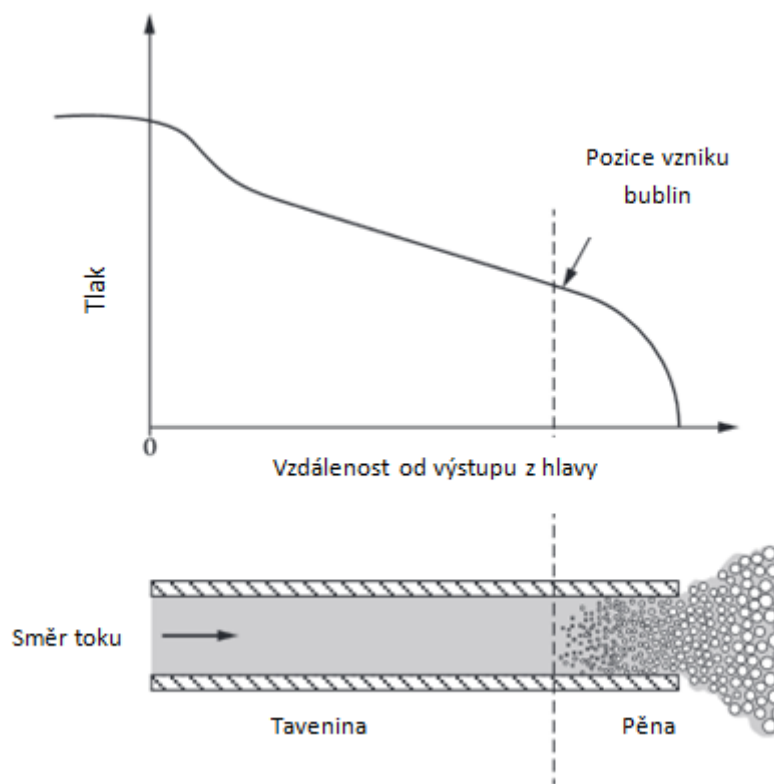
Název / zkratka	Typ reakce	Teplota rozkladu (°C)	Množství uvolněného plynu (cm <sup>3</sup> /g)	Typ nadouvacího plynu
kyselina citrónová + hydrogenuhličitan sodný	Endo	160 – 210	120	CO <sub>2</sub>
Azodikarbonamid (ADCA)	Exo	205 – 212	220	N <sub>2</sub>
Oxybis(benzen) sulfonyl hydrazin (OBSH)	Exo	158 – 160	125	N <sub>2</sub>
Toluen sulfonyl hydrazin (TSH)	Exo	110 – 120	115	N <sub>2</sub>
Toluen sulfonyl semicarbazid (TSS)	Exo	228 – 235	140	N <sub>2</sub>
Dinitro pentamethylen tetraamin (DNPT)	Exo	190	190	N <sub>2</sub>
5-Fenyl tetrazol (5PT)	Exo	240 – 250	220	N <sub>2</sub>

### 2.3 Nukleace pěny

Vznik buněčné struktury a především velikost buněk je ovlivněna nukleací, především počtem nukleačních zárodků ve směsi polymerní tavenina - nadouvadlo. Řízením struktury lze upravovat užité vlastnosti jako například tepelnou vodivost, která je u izolací velmi důležitá. Nejedná se o klasickou nukleaci krystalických a semikrystalických polymerů, ale o zárodky, na kterých expanduje nadouvadlo. [11]

V předchozím odstavci bylo naznačeno, že u chemických nadouvadél vzniká při rozkladu i pevná částice a ne pouze plyn. Tento zbytek slouží jako centrum nukleace a na něj se navazují molekuly nadouvacího plynu. Na rozdíl od chemických nadouvadél se do fyzikálních nadouvadél musí nukleační činidlo přidávat dodatečně. Mírnou výhodou při výrobě pěn s fyzikálními nadouvadly je to, že strukturu, tedy velikost buněk, lze řídit dle potřeby ubráním nebo přidáním nukleantu. U chemických nadouvadél je počet nukleačních zárodků dán rozkladnou reakcí. [11]

Dalším způsobem, jak řídit strukturu je tlak. U výroby pěn je velmi důležité, aby tlak nespádl během procesu pod kritickou hodnotu, která je pro každý systém polymer nadouvadlo specifická. Pokud se tato podmínka nepodaří splnit, začne takzvané lehčení v hlavě. To znamená, že se nadouvadlo začne expandovat už ve vytlačovací hlavě extrudéru a výrobky mají různé defekty nebo jsou jinak poškozené. Pokud je podmínka kritického tlaku splněna, tedy tlak v extrudéru je vyšší, dochází ke standardní extruzi pěny, tak jak je znázorněno na obrázku 5. Pokud se tlak podaří zvýšit, například vyšším zchlazením polymerní taveniny, zvýší se jemnost pěny. V opačném případě, tedy při snížení tlaku, bude struktura výrazně hrubší. [11]

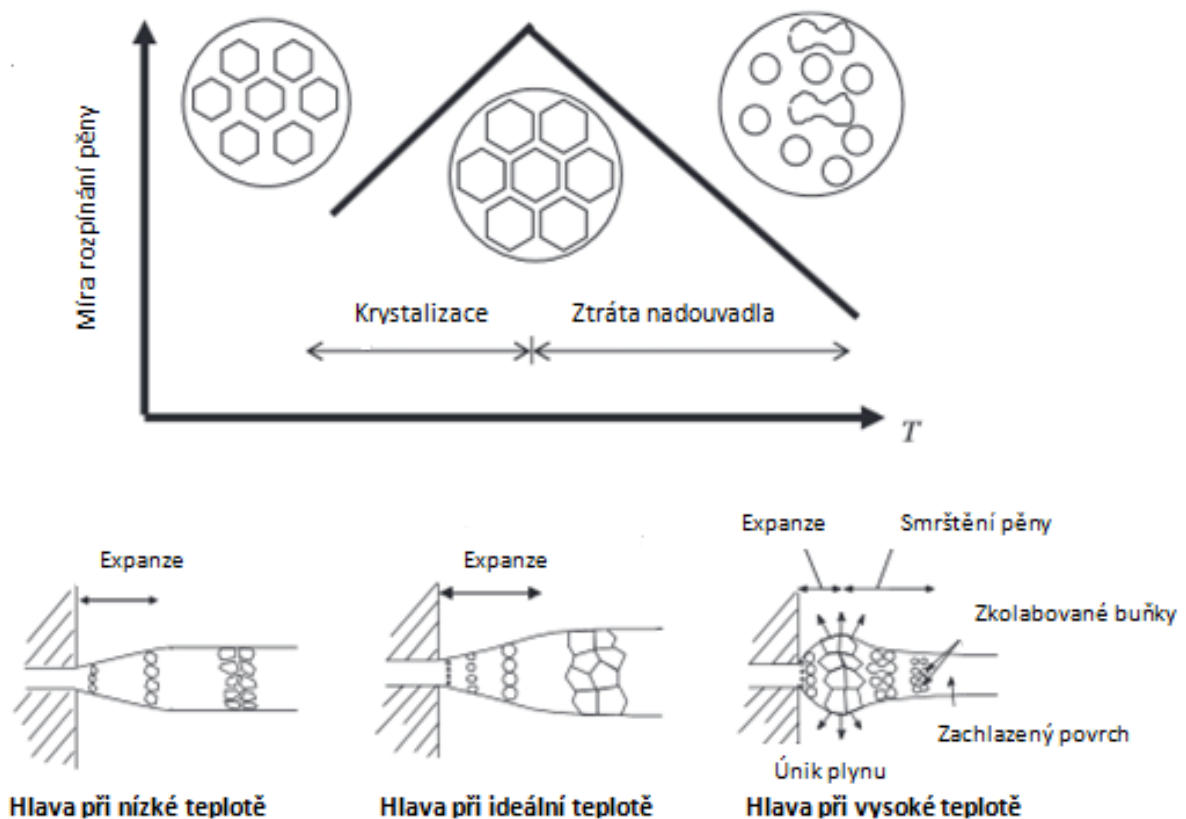


Obr. 5: Vliv tlaku na pozici pění [12]

Hrubá či jemná struktura řízená vlivem tlaku jde poměrně jednoduše vysvětlit. Pokud je tlak nízký, začíná napěňování více v hlavě a cely mají možnost srůstat ve větší celky a poté se jeví jako velké buňky. Naopak jemná struktura začíná pění blíže konci vytlačovací hlavy a riziko srůstu je tím pádem minimální [11].

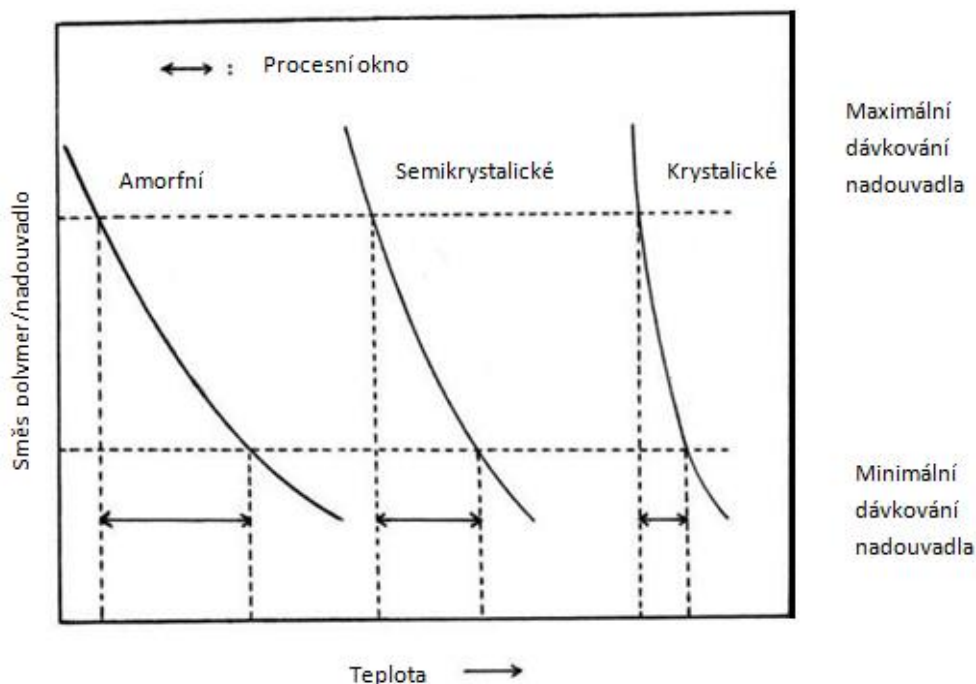
## 2.4 Vliv teploty na pění

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách vliv teploty a tedy viskozity je velmi důležitý pro zpracování pěn. Všechny důležité parametry extruze tedy teplota, tlak a viskozita jsou spolu pevně spjaté. Jakmile se zvýší teplota, klesá viskozita a tím i tlak. Přesná procesní teplota je tedy důležitá a měla by odpovídat teplotě krystalizace daného semikrystalického nebo krystalického polymeru. U amorfních polymerů, jako polystyren, musí být teplota nad teplotou skelného přechodu, aby byl umožněn pohyb segmentů a tím i růst pěny. Na obrázku 6 je patrné, že pokud je teplota taveniny příliš vysoká, nadouvadlo vlivem nízké viskozity roztrhá celou buněčnou strukturu a unikne. Struktura pěny tedy kolabuje i za použití modifikátorů permeace. Na druhou stranu, pokud je teplota příliš nízká začne polymerní tavenina krystalizovat příliš brzy a opět může dojít k roztrhání buněčné struktury. [13,14]



Obr. 6: Vliv teploty na proces pění [13]

Je tedy velmi důležité naladit proces do správného procesního okna, které ovšem nebývá nijak široké. U semikrystalických polymerů se procesní okno nachází v rozmezí několika stupňů Celsia. Důležitým faktem je také to, že jakmile nadouvadlo přejde z kapalně fáze do plynné, uvolní se výparné teplo a celou pěnu ochladí, a tedy ještě více zafixuje vzniklou strukturu. Obrázek 7 ukazuje procesní okna pro termoplastické polymery. [13,14]



Obr. 7: Procesní okno u amorfních, semikrystalických a krystalických polymerů [15]

## 2.5 Rozdělení pěn

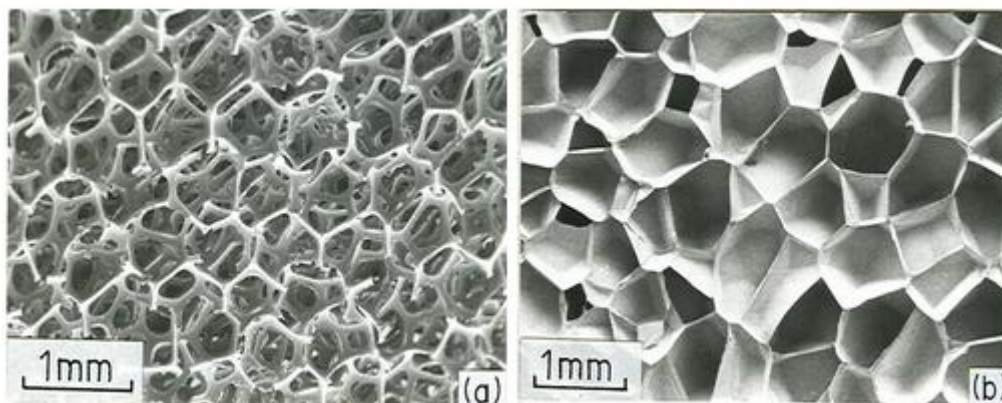
Pěny lze dělit do různých kategorií podle různých kritérií. Jedním z podstatných parametrů pěn je jejich hustota neboli objemová hmotnost. Na základě tohoto parametru dělíme pěny na pět skupin, a to:

- velmi lehké ( $\rho = 3 - 50 \text{ kg/m}^3$ )
- lehké ( $\rho = 50 - 200 \text{ kg/m}^3$ )
- střední ( $\rho = 200 - 500 \text{ kg/m}^3$ )
- těžké ( $\rho = 500 - 700 \text{ kg/m}^3$ )
- supertěžké ( $\rho > 700 \text{ kg/m}^3$ ). [16]

Dalším důležitým faktorem u pěn je to, jaký typ struktury tvoří. Mezi dva základní druhy patří: - otevřená struktura

- uzavřená struktura.

Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma strukturami spočívá v tom, že u pěn s uzavřenými celami má každá buňka pevné stěny ohraničené ze všech stran. Cely mají tvar mnohostěnů, jak je patrné na obrázku 8. Na rozdíl od pěn s uzavřenou strukturou mají pěny s otevřenou strukturou podobný tvar, ale cely nemají stěny. Celá buněčná struktura má tedy pouze takzvaná žebra. Typ buněčné struktury má však zásadní význam na fyzikální vlastnosti pěny. Pěny s otevřenými celami mají výbornou zvukovou pohltivost a nasákavost. Naproti tomu pěny s uzavřenými celami jsou výborné tepelné izolanty. [13,14]



Obr. 8: *Otevřená struktura polyuretanu (vlevo) a uzavřená struktura polyethylenu (vpravo) [17]*



### 3 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY S DŮRAZEM NA POLYETHYLEN

Pro výrobu pěn se používá mnoho různých materiálů ze skupiny termoplastů, tedy materiálů, které lze opakovaně zpracovávat. K nejběžnějším materiálům patří především polystyren, polyethylentereftalát, polyvinyl a polyolefiny. Firma Spur a.s. se zabývá výrobou pěn z LDPE, který patří do skupiny polyolefinů. Pod tímto pojmem rozumíme homopolymery olefinů neboli alkenů. Přehled nejběžnějších polyolefinů a jejich vlastností shrnuje tabulka 3. [13,18]

Tabulka 3: Přehled nejběžnějších polyolefinů a jejich vlastností [18]

Polyolefin		Krystalinita %	Hustota $\text{g cm}^{-3}$	Teplota tání °C	Modul $E$ MPa	Pevnost v tahu MPa
polyethylen lineární	$[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$	65 až 95	0,954 až 0,970	125 až 136	700 až 1 400	20 až 33
		50 až 70	0,915 až 0,935	105 až 115	200 až 400	9 až 15
polypropylen izotaktický	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \end{array} \right]_n$	60 až 70	0,905 až 0,912	160 až 176	1 100 až 1 500	34 až 38
		0	0,85 až 0,87	$(T_g = -25^\circ\text{C})$	–	–
poly-1-buten izotaktický	$\left[ \begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{C}_2\text{H}_5 \end{array} \right]_n$	40 až 50	9,15	125	200 až 500	10 až 15
		0	0,880	$(T_g = -3^\circ\text{C})$	–	–
polyisobutylen ataktický	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\   \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	0	0,90 až 0,92	$(T_g = -73^\circ\text{C})$	–	2 až 6
poly-4-methyl- -1-penten izotaktický	$\left[ \begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	40	0,83	179	1 500	27,5

#### 3.1 Polyethylen

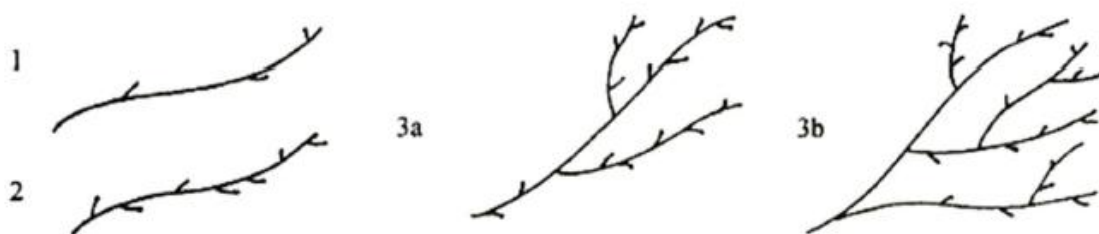
Základní strukturální jednotkou polyethylenu je uhlíkový řetězec, který nese žádné jiné substituenty, pouze vodíkové atomy. Rozdílné vlastnosti různých typů polyethylenu silně souvisí s jejich morfologií, především v míře větvení a tedy s obsahem krystalické fáze. Zatímco čistě krystalická struktura má hustotu  $1000 \text{ kg/m}^3$ , čistě amorfní struktura se vyznačuje hustotou  $855 \text{ kg/m}^3$ . Čím více má polyethylen lineárních řetězců, tím více má krystalické fáze a naopak. V dnešní době bylo vyrobeno

velmi mnoho typů polyethylenových řetězců s různou hustotou, jak ukazuje tabulka 4. [18,19]

Tabulka 4: Rozdělení polyethylenů podle hustoty [18]

Typ	Zkratka	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE (Ultra-Low Density)	0,888–0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE (Low Density)	0,910–0,955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE (Linear Low Density)	0,918–0,955
PE se střední hustotou	MDPE (Medium Density)	0,925–0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE (High Density)	0,941–0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE (High Molecular Weight HDPE)	0,944–0,954 MH = 200 000–500 000
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE (Ultra-High Molecular Weight HDPE)	0,955–0,957 MH = 3 000 000–6 000 000

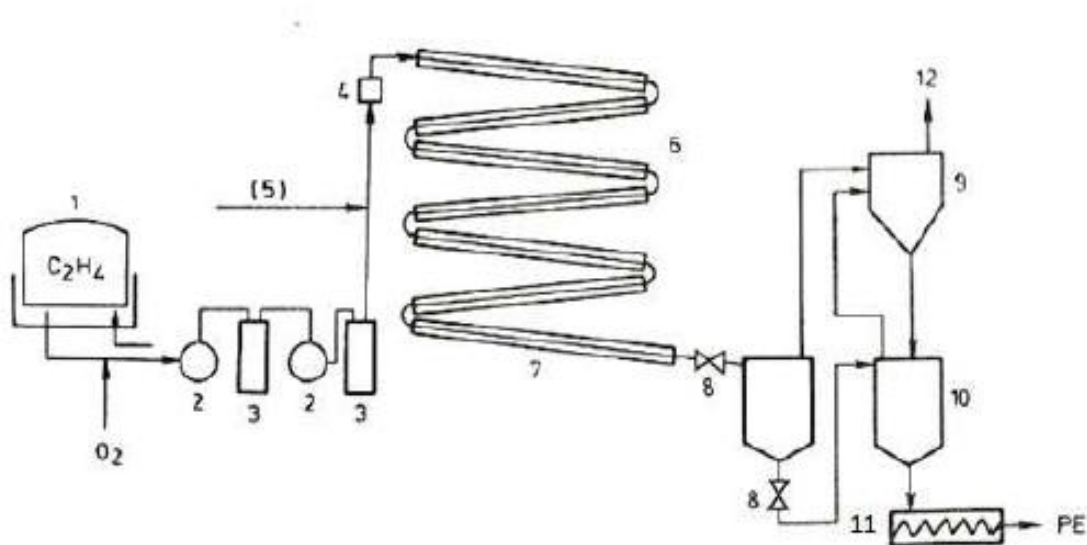
Zatímco polyethyleny s ultravysokou molekulovou hmotností jsou spíše speciální typy, které mají pouze omezené uplatnění, vysokohustotní polyethylén (HDPE), nízkohustotní polyethylén (LDPE) a lineární nízkohustotní polyethylén (LLDPE) jsou velmi rozšířené a zpracovávají se mnoha různými technologiemi. Pohled na jejich strukturu řetězců shrnuje obrázek 9. [18]



Obr. 9: Struktura makromolekul různých typů polyethylenů: 1 – HDPE, 2 - LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé větvení, a – trubkový reaktor, b – autokláv) [18]

### 3.1.1 Výroba LDPE

Polyethylen o nízké hustotě, z anglického low density PE (LDPE), je vyráběn radikálovou polymerací při vysokých teplotách a velmi vysokých tlacích. Právě proto je LDPE někdy označován jako vysokotlaký polyethylen. Jeho výroba byla objevena už v roce 1933 firmou ICI. V dnešní době je LDPE vyráběn dvěma způsoby, v trubkových reaktorech nebo autoklávech. Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi je ve výsledné struktuře, jak ukazoval obrázek 9. Z trubkových reaktorů jsou řetězce krátce větvené, zatímco z autoklávů jsou řetězce velmi silně větvené a vedou ke vzniku dendritických, tedy strom připomínajících, struktur. Hlavní příčinou tohoto větvení je přenos radikálů. Zatímco u trubkových typů se jedná o přenos intramolekulární se vznikem krátkých butyl-skupin, u autoklávových typů se jedná o přenos intermolekulární. U dnešních technologií převládá výroba pomocí trubkového reaktoru, jehož schéma je na obrázku 10. [18,19]



Obr. 10: Schéma trubkového reaktoru: 1-plynojem, 2-kompresor, 3-filtr, 4-explozní pojistka, 5-iniciátory, 6- reaktor, 7-chladič produktu, 8-redukční ventil, 9- cyklón, 10-odlučovač PE, 11-extrudér, 12- nezreagovaný plyn [18]

V roce 1938 se jako iniciátor používal kyslík, nyní se používají organické alkyl a acyl peroxidy, které iniciují reakci v různých zónách trubkového reaktoru. Různým nastavením teplotního profilu, typem iniciátoru a jeho koncentrací, ale i dobou zdržení ethyleny lze získat polyethylen o různých vlastnostech. Parametry trubkových reaktorů

bývají různé, většinou se však jedná o trubice v průměru 3 až 6 cm v průměru a délkou od 500 do 1600 m. Rychlost proudění plynu je okolo 10 m/s. Reakční doba je tedy v závislosti na délce rektoru a rychlosti proudění 20 s až 2 min a konverze plynu dosahuje 30 – 35 %. Nezareagovaný plyn je však odsáván, čištěn a opět vstřikován do rektoru. Produkce trubkových reaktorů je 6 – 18 t/hod. Celý proces pracuje při tlaku až 350 MPa a teplotách až 340 °C. Naproti tomu autoklávy pracují sice při nižších tlacích (do 250 MPa) a nižších teplotách (do 300 °C), mají ale menší výtěžnost, která je do 20 % konverze plynu na polyethylen. To je zřejmě nejdůležitější faktor, proč trubkové reaktory převládají nad autoklávy. [18,19]

### 3.1.2 Výroba HDPE, LLDPE

Výroba lineárního typu polyethylenu je v dnešní době tvořena třemi základními technologickými postupy – roztokovým, suspenzním a v plynné fázi. Suspenzní postup je nejstarším procesem a dodnes se hojně používá při výrobě HDPE. Na rozdíl od HDPE je LLDPE vyráběn roztokovým procesem a jedná se o kopolomery ethylenu s 1-butenem, 1-hexenem, 4-methyl-1-pentenem nebo 1-oktenem. Fluidním procesem, tedy výrobou z plynné fáze, lze vyrábět oba typy polyethylenů, jak HDPE tak i LLDPE. Rozdíly v technologických podmínkách jsou patrné z tabulky 5 [18,19].

Tabulka 5: Rozdíly v technologických podmínkách [18]

<i>Proces</i>	<i>Teplota [°C]</i>	<i>Tlak [MPa]</i>	<i>Konverze [%]</i>
<i>Suspenzní</i>	85 – 110	2 – 3	95 – 98
<i>Roztokový</i>	140 – 300	3 – 20	95
<i>Plynná fáze</i>	90 – 100	1 – 2	2

### 3.1.3 Vlastnosti a použití polyethylenu

Polyethylen je tuhá látka, která má na omak voskovitý charakter. Všechny typy se vyznačují vysokým stupněm krystalinity a teplotou tání v intervalu 105 – 136 °C. Polyethylen se také vyznačuje vysokou houževnatostí, tažností a stálostí proti chemickým činidlům. Za normální teploty se nerozpouští v žádném rozpouštědle, teprve při teplotách nad 50 °C se většina typů polyethylenu rozpouští v aromatických nebo chlorovaných uhlovodících. Polyethylen také nepropouští vodní páru a je mrazuvzdorný. Na druhou stranu podléhá studenému toku a má sklon praskat pod napětím. Polyethylen, který není stabilizovaný má nízkou odolnost proti povětrnosti, hlavně proti slunečnímu záření. Rychlost fotodegradace roste s počtem terciálních uhlíků a klesá se zvyšující se krystalinitou, protože k degradaci dochází hlavně v amorfních částech. Antioxidanty mají vysokou účinnost proti tepelné oxidaci, jejich účinnost proti fotooxidaci je velmi malá. Nejúčinnějším stabilizátorem jsou saze. [18,19]

Mezi komerčními typy polyethylenů jsou zásadní rozdíly ve stupni krystalizace, hustotě a molekulové hmotnosti. Pro každou aplikaci a typ zpracování lze vybrat několik druhů vyráběných polymerů. Polyethylen se zpracovává mnoha technologiemi, kde nejčastější jsou vytlačování, vstřikování a vyfukování. Velká část objemu polyethylenu se zpracuje na fólie a jiné obalové materiály, nicméně se z tohoto materiálu vyrábí trubky, profily ale také hračky. [18,19]

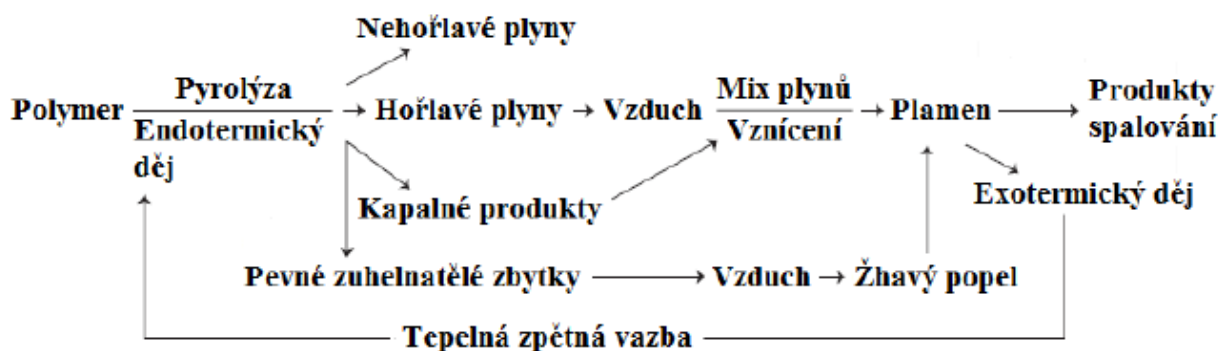
LDPE se používá na výrobu pěn, z důvodu jeho vysoké pevnosti taveniny oproti HDPE a LLDPE. Pevnost taveniny souvisí úzce s již zmiňovanou morfologií. Obecně lze říct, že čím více je polymer rozvětvený, tím vyšší je pevnost taveniny.

## 4 HOŘLAVOST A RETARDÉRY

### 4.1 Základní pojmy hořlavosti

Nejprve je důležité uvést několik základních pojmů o chování polymerů za zvýšené teploty. K těmto pojmům lze přiřadit především teplotu vzplanutí, teplotu vznícení a teplotu hoření, kdy teplota vzplanutí je nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení plyných produktů rozkladu. U teploty vznícení se jedná o nejnižší teplotu vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde k samovolnému zapálení vzorku nebo plyných produktů bez přítomnosti vnějšího zdroje. U teploty hoření je to pak nejnižší teplota, při které dojde k přiblížení malého plamene k zapálení a hoření po stanovenou dobu, dle normalizovaných zkušebních podmínek. [20,21]

Důležitou poznámkou je také to, že proces hoření je exotermický děj, tedy že se z něj uvolňuje energie ve formě tepla. Naopak proces pyrolýzy, kdy dochází k dekompozici polymeru na nízkomolekulární fragmenty, je silně endotermický. Aby došlo k plynulému hoření polymeru, je nutné, aby energie, která je uvolněná při hoření, byla vyšší, než energie spotřebovaná na rozklad polymeru. Toto zjednodušené schéma popisuje obrázek 11. [22]



Obr. 11: Schéma cyklu hoření polymerů [22]

Retardéry hoření jsou aditiva, tedy látky, které se přidávají do polymerní směsi, za účelem snížení hořlavosti hotového výrobku. U výrobků z LDPE pěny jsou tyto aditiva nezbytná, jestliže se předpokládá aplikace, u které je vyžadována zvýšená

odolnost proti hoření. Samotný polyethylen je dobře hořlavý a struktura pěny tomu ještě přispívá. [20,21]

Obecně lze říct, že se proces hoření skládá z pěti kroků, kterými jsou: ohřev, rozklad, vzplanutí, hoření a propagace ohně. Použitý retardér může zabraňovat procesu hoření v jakémkoliv z těchto kroků. Je důležité poznamenat, že kvalitní retardér nejen zpomaluje hoření, ale také snižuje vznik kouře a toxických zplodin. [20,21]

Na hoření polymeru a jeho tepelnou stabilitu má také velký vliv několik dalších parametrů. Některé z nich jako například přítomnost kyslíku, dvojně vazby a větvení řetězců tepelnou stabilitu snižují. Naopak aromatická jádra a zesíťování tepelnou stabilitu zvyšují [22].

## 4.2 Retardéry hoření

Retardéry hoření můžeme rozdělit podle několika způsobů. Jedním z možných dělení podle způsobu retardace hoření, tedy fyzikální nebo chemický, dále lze retardéry rozdělit podle začlenění do matrice, a nebo podle složení [23].

### 4.2.1 Rozdělení podle způsobu retardace

#### *Fyzikální způsob*

Jako fyzikální způsob retardace lze považovat především ochlazení pomocí endotermního materiálu, který spotřebovává teplo potřebné na pyrolýzu polymeru. [23]

K dalšímu fyzikálnímu způsobu lze přiřadit vytvoření ochranné vrstvy, která zabraňuje přístupu kyslíku k polymeru a tím zabraňuje propagaci vysoce reaktivních radikálů typu  $O\cdot$  a  $OH\cdot$ . [23]

Mezi další způsob fyzikální retardace lze také přidat ředění vznikajících plynů pomocí vodní páry nebo oxidu uhličitého. [23]

#### *Chemický způsob*

K chemické retardaci může docházet jak v plynné, tak v pevné fázi. Pokud nastává retardace v plynné fázi, tak většinou dochází k uvolnění plynného radikálu,

který reaguje s reaktivními radikály  $O^{\bullet}$  a  $OH^{\bullet}$  a zapříčiní pokles koncentrace těchto radikálů pod kritickou hodnotu. Plamen zhasne a systém se ochladí. [23]

Naproti tomu systémy, které se uplatňují v pevné fázi, mohou způsobovat například tání polymeru, který odtéká od plamene. Lze si to představit jako vosk svíčky bez knotu. U těchto typů retardérů je ovšem riziko spojené se vznikajícími hořlavými kapkami. [23]

Některé retardéry mohou tvořit zuhelnatěnou vrstvu na povrchu polymeru a tím snižují tvorbu kouře a jiných produktů, které mohou vznikat při nedokonalém spalování.

Mezi další typy patří také pěnotvorné retardéry, které vytvoří na povrchu polymeru nehořlavou pěnu, která způsobuje lepší izolaci od plamene než zuhelnatěná vrstva. [23]

#### **4.2.2 Rozdělení podle začlenění do polymerní matrice**

Reaktivní retardéry se přidávají do systému již během polymerace a jsou tak součástí řetězců polymeru. Nevýhodou je to, že výsledný produkt má retardační účinky, ale má také zcela jiné mechanické vlastnosti, než výchozí polymer.

Aditivní retardéry jsou většinou přidávány až při samotném zpracování a jedná se tedy o směs polymeru s retardérem. Na rozdíl od reaktivních retardérů mohou být tedy snáze uvolněny z polymeru. Toto snadné uvolnění se však může stát jejich nevýhodou, protože mohou kontaminovat životní prostředí. [24]

#### **4.2.3 Rozdělení dle chemického složení**

Snad k nejdůležitějšímu rozdělení retardérů hoření patří jejich dělení podle chemického složení. K prvkům, které se objevují u retardérů hoření, patří především brom, chlor, fosfor, antimon, hliník, hořčík, dusík, síra, křemík a méně častěji také zinek, železo, cín a molybden. U aditivních retardérů hoření jsou tyto prvky přidávány do směsi v různých formách, nejčastěji však jako aromatické, alifatické a alicyklické sloučeniny nebo ve formě hydroxidů a oxidů. Důležitou poznámkou je také to, že retardéry hoření se používají v kombinacích a využívá se tak jejich synergického efektu. [25]



#### 4.2.3.1 Retardéry obsahující halogen

Hlavním retardačním účinkem halogenových retardérů je především reakce halogenovodíku, jehož zdrojem tyto sloučeniny jsou, s už zmiňovanými radikály  $O\cdot$  a  $OH\cdot$  v plynné fázi, které vznikají při oxidačních procesech při hoření polymerů. Následná reakce probíhá podle těchto základních rovnic (1,2):



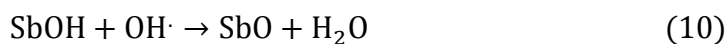
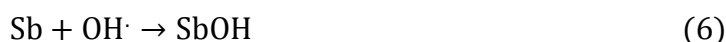
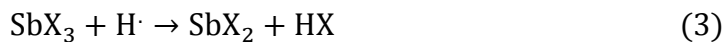
Těmito reakcemi reaktivní radikály zanikají a tím dochází ke zpomalování nebo dokonce k zastavení hoření. Velkou výhodou těchto retardérů je to, že dochází k regeneraci halogenovodíku při reakci halogenového radikálu s látkami obsahující vodík. Tyto látky vznikají při procesu hoření. Samotný halogenovodík se v reakční směsi objeví přímo z retardéru dehydrohalogenací, tedy odštěpením a poté již zmíněnou regenerací. [23, 25 – 28]

Snadnost s jakou lze halogenový radikál uvolnit, závisí především na pevnosti vazby halogenu s uhlíkem. Obecně lze říct, že pevnost klesá v řadě  $F > Cl > Br > I$ . Z tohoto pohledu jsou nejúčinnějšími retardéry látky s jódem a nejméně účinné s fluorem, nicméně sloučeniny jódu vykazují velmi malou světelnou a tepelnou stabilitu. Z tohoto důvodu jsou pro použití jako retardéry prakticky nepoužitelné. Naopak sloučeniny fluoru jsou natolik stabilní, že k jejich rozkladu nedochází téměř vůbec. Jako optimální sloučeniny jsou tedy sloučeniny s bromem a chlorem. Nejčastěji se používají alifatické chlorované retardéry a bromované aromatické retardéry. [23, 25 – 28].

Aby byla zvýšena účinnost halogenových retardérů, přidávají se do směsi látky se synergickým účinkem. To znamená, že součet retardačních účinků je vyšší u směsi, než u čistých složek. Nejpoužívanější synergickou látkou v kombinaci s halogenovými retardéry je především oxid antimonitý, který však samostatně retardační účinek nemá téměř žádný. [23, 25 – 28].

Rovnice popisující přesně retardaci za použití oxidu antimonitého není zcela jednoznačně popsána. Podle různých teorií je základem reakce halogenovodíku s oxidem

antimonitým, které poté reagují v plynné fázi. Jedna z pravděpodobných teorií udává tyto následující retardační reakce (3 – 10). [23, 25 – 28]:



Proti použití oxidu antimonitého se však objevují jisté výhrady, a to především kvůli negativnímu dopadu na životní prostředí z důvodu toxicity, ale také pro velmi vysokou cenu této látky. Z tohoto důvodu se hledají různé alternativy, které by navíc mohly mít vyšší synergický účinek, a na dosažení stejného efektu retardace by stačilo dávkování v nižších koncentracích. Podle odborné literatury jsou vhodnými náhradami za oxid antimonitý především oxid zinečnatý, oxid železitý, boritan zinečnatý, fosforečnan zinečnatý a mnoho dalších látek je podrobena testování. [23, 25 – 28]

#### 4.2.3.2 Retardéry obsahující fosfor

Při použití retardérů hoření na bázi fosforu se využívá především jeho vlastnosti působit jako redukční činidlo. To znamená, že se při hoření oxiduje. Při použití oxidu fosforečného a kyseliny fosforečné vznikají jako produkty oxidace v kondenzované fázi zbytky, které tvoří na povrchu zuhelnatěnou vrstvu. Tato vrstva slouží jako tepelná izolace, která sťažuje přestup tepla ze zóny hoření a zároveň chrání polymer před reakcí s kyslíkem. Některé literární prameny uvádějí [23, 25], že inhibičně působí i rozkladné produkty kyslíkatých sloučenin fosforu v plynné fázi. Fosforové retardéry mohou být použity jako alternativa k halogenovým retardérům. Přestože mají retardéry hoření na

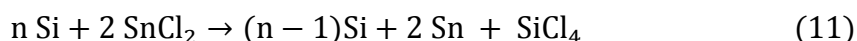
bázi fosforu vysokou efektivnost retardace, nejsou zcela vhodné pro některé skupiny polymerů, jako například polystyren nebo polyolefiny. Přesto jsou velmi rozšířenou skupinou. [23, 25 – 28]

Červený fosfor je velmi hojně používaným retardérem, protože pro dobré výsledky retardace nevyžaduje vysoké koncentrace dávkování, takže má malý vliv na změnu mechanických vlastností produktu. Červený fosfor je netoxický, ale vlhkém prostředí reaguje s vodou za vzniku nebezpečného fosfinu. Tuto nevýhodu lze odstranit tím, že se fosfor smíchá s látkou, která ho obalí a působí jako nosič. Vzniklá směs se označuje jako masterbatch a jako nosič se používá stejný typ polymeru, jako ten, u kterého je požadovaná retardace. Tím je zajištěna dobrá mísitelnost a rozptýlení ve výsledném produktu. Obvyklá koncentrace červeného fosforu v masterbatchi je 50 %. K dalším typům nosičů patří hydroxid hlinitý, který se také používá jako retardér, a navíc má ve směsi s fosforem synergický efekt. [23, 25 – 28]

Organické fosfáty jsou další významnou skupinou retardérů na bázi fosforu. Do této skupiny patří alkyl a arylestery kyseliny fosforečné, zřídka jsou používány alkylarylfosfáty. Retardační působení organických fosfátů je především v pevné fázi, protože tepelným rozkladem retardéru kyseliny fosforečné vznikají látky, které zabraňují nebo zpomalují proces degradace polymeru. Další výhodou těchto retardérů je, že vytváří, podobně jako červený fosfor, na povrchu zuhelnatěnou vrstvu, která znemožňuje přístup kyslíku. Pro zvýšení účinnosti organických fosfátů je do těchto retardérů přidáván chlor nebo brom v alkylové nebo v arylové skupině. Při srovnání chlorovaných a bromovaných organických fosfátů bylo zjištěno, že mnohem vyšší retardační účinek mají bromované fosfáty. Tento rozdíl je vysvětlován pomocí vyšší molekulové hmotnosti bromu, který je ve směsi s fosforem méně těkavý a zůstává proto déle v zóně plamene [23, 25 – 28].

#### 4.2.3.3 Retardéry obsahující křemík

Tyto retardéry se používají především v kombinaci s chloridy cínu, olova, mědi a vápníku. Podle literatury [23, 25] probíhá retardace podle těchto rovnic při teplotě 350 – 500 °C (11 – 12):





Vznikající chlorid křemičitý reaguje s vodní párou za vzniku chlorovodíku, který reaguje v plynné fázi. Při použití chloridu cínatého je retardační účinek vyšší, protože kromě retardace v plynné fázi dochází k tvorbě zuhelnatěného povrchu. Velkou výhodou při použití těchto retardérů je jejich zdravotní nezávadnost. Tyto retardační systémy se používají především pro retardaci polyamidů a některých polyolefinů. [23, 25 – 28].

Dalším typem retardéru obsahujícím křemík jsou silikony s lineárními a rozvětvenými řetězci, s alifatickými i aromatickými skupinami. Inhibice hoření působí především v tuhé fázi, protože silikony podporují především tvorbu zuhelnatěného zbytku a snižují vývin kouře. Optimální dávkování je 10 %. Toto množství má zanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti výrobku. K další přednosti silikonů patří vysoká teplotní odolnost a tím i možnost použití pro polymery s vysokou teplotou tání jako polykarbonát a polyfenylenoxid [23, 25 – 28].

#### 4.2.3.4 *Ostatní retardéry hoření*

##### *Hydroxid hlinitý*

Retardační účinek hydroxidu hlinitého spočívá především v jeho endotermickém rozkladu na oxid hlinitý a vodu, při teplotním intervalu 200 – 310 °C. Retardační účinek spočívá v odebrání tepla a vznikající voda ve formě páry zředí směs hořlavých plynů a zároveň zabraňuje přístupu kyslíku. Velkou nevýhodou při použití hydroxidu hlinitého je to, že je potřeba vysokého dávkování až 60 %, a to negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Toto vysoké dávkování lze snížit při použití velmi jemných částic s vhodnou distribucí a jejich případnou povrchovou úpravou, například kyselinou stearovou, která usnadňuje zpracovatelnost. Velkou výhodou hydroxidu hlinitého je však jeho zdravotní nezávadnost a produkty jeho rozkladu nejsou korozivní. Hydroxid hlinitý je vhodný pro izolace kabelů z PVC, ale i pro polyolefiny nebo reaktoplasty. [23, 25 – 28]

*Hydroxid hořečnatý*

Retardační účinek hydroxidu hořečnatého je obdobný jako u hydroxidu hlinitého, tedy endotermický rozklad na vodu a oxid hořečnatý. Rozkladná reakce však probíhá v teplotním intervalu 340 – 440 °C. U hydroxidu hořečnatého není retardace způsobena jen vývinem vodní páry, ale u polymerů s reaktivními bočními skupinami dochází k síťování polymeru a tím dochází ke vzniku více stabilní zuhelnatěné vrstvy.

Pokud se ovšem hydroxid hořečnatý použije u polymerů s lineárními řetězci, k žádnému síťování nedochází. Podle literatury [23, 25] byl tento rozdíl zkoumán u kopolymerů ethylen-vinyl acetát a ethylen-ethylakrylát ve srovnání s čistým polyethylenem. Podle očekávání byl retardační účinek vyšší u kopolymerů ethylenu. [23, 25 – 28].

Nevýhodou použití hydroxidu hořečnatého je to, že oxid hořečnatý je schopen katalyzovat oxidační reakce uhlíku a jeho zuhelnatěných zbytků, což vede k přetrvávajícímu dožehu, který snižuje retardační účinek. Stejně jako u hydroxidu hlinitého je nutné vysoké dávkování, které má za následek snížení mechanických vlastností. Platí zde opět analogie jako u hydroxidu hlinitého, že se používají částice o vysoké čistotě a velikosti cca 1 μm. Hydroxid hořečnatý se uplatňuje především při retardaci polyolefinů a polyamidů [23, 25 – 28].

*Boritan zinečnatý*

Tento retardér patří do skupiny krystalických, anorganických látek o chemickém vzorci  $2 \text{ZnO} \cdot 3 \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ . Předpokládá se, že voda obsažená v krystalické mřížce je ve formě hydroxylových skupin vázaných na atomy boru. Teplota, při které probíhá uvolňování vody, je 290 °C. Do retardace hoření se zapojují všechny složky boritanu zinečnatého, tedy voda, oxid zinečnatý a oxid boritý. U tohoto retardéru je také velmi důležité, zda se ve výrobku nachází látka obsahující chlor. Pokud ano, retardační účinek se ještě zvýší. Odborná literatura [23, 25], uvádí, že přibližně 40 % zinku přechází do plynné fáze a má podobně jako oxid antimonitý s chlorem synergický účinek. Na rozdíl od oxidu antimonitého má však oxid zinečnatý také tu vlastnost, že podporuje síťovací reakce a tvorbu uhlíkového zbytku, což retardaci urychluje. Pokud se však ve výrobku látka obsahující chlor nevyskytuje, používá se boritan zinečnatý v kombinaci s hydroxidem hlinitým. Tato kombinace se používá hlavně pro izolace

kabelů, protože je potlačen vývin kouře a neuvolňují se korozivní látky jako při použití PVC jako izolantu.

Jako retardér pro speciální polymery, které se zpracovávají za vysokých teplot a většina retardéru je vzhledem k jejich teplotě rozkladu nepoužitelná, se používá také anhydrid o složení  $2 \text{ZnO} \cdot 3 \text{B}_2\text{O}_3$ . Těmito polymery jsou například: polyfenylenoxidy, polyethersulfony a nebo polyestersulfony [23, 25 – 28].

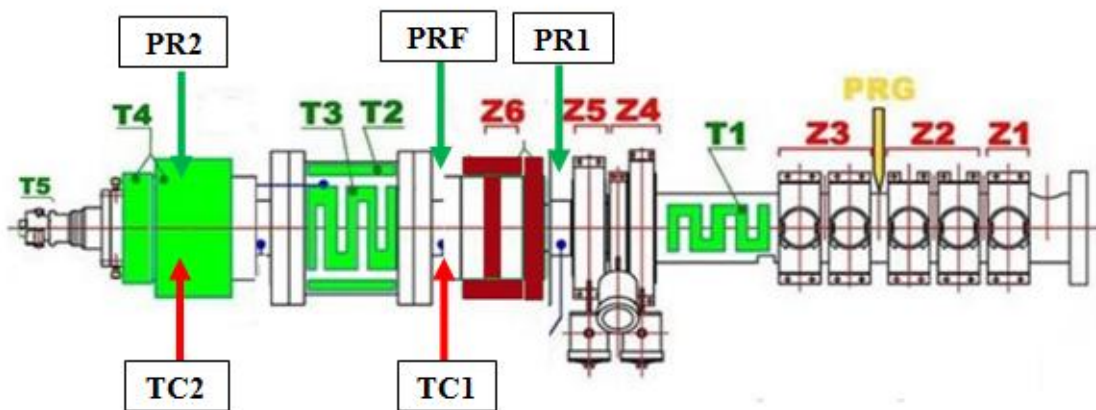
Po nastudování odborné literatury byly pro experimenty vybrány komerčně dostupné retardéry hoření na halogenové bázi, jednak pro jejich příznivou cenu a dobrou dostupnost. Některé typy retardérů, například: sloučeniny na bázi fosforu, křemíku a anorganické sloučeniny byly vyloučeny. Z důvodu očekávané vysoké nukleace vlivem drobných částic. Zároveň je jejich účinnost dána vysokým plněním, což je procesně nemožné.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Tradiční receptura používaná k vytlačování pěn byla rozšířena o vybrané retardéry hoření. Konečná receptura směsi se tak skládala z LDPE, nadouvadla, nukleačního, antikolapsu a retardéru hoření. Jedná se o masterbatche na bázi halogenovodíků a synergické látky.

Při přípravě vzorků byl sledován vliv na procesní parametry, kterými jsou především teploty a tlaky, podél vytlačovacího stroje. Procesní podmínky byly během přípravy vzorků konstantní, aby bylo možné sledovat vliv změny receptur na zpracovatelské podmínky. Nastavené teploty jsou uvedeny v tabulce 6. Teplotní a tlaková čidla jsou vyznačena na schematicém obrázku 12. Tlaková čidla jsou na obrázku označena zelenou šipkou a jsou u nich uvedeny popisky, které jsou dále používány.



Obr. 12: Schéma vytlačovacího stroje a rozmístění teplotních a tlakových čidel

Tlakové čidlo PR1 je umístěno před screenchangerem a tlakové čidlo PRF je umístěno za ním. Protože během zkoušek nebyl v extrudéru umístěn lamač s filtrační tkaninou, rozdíl tlaků byl téměř nulový a z toho důvodu se tlak na tlakovém čidle PRF nezaznamenával. Tlakové čidlo PR2 je umístěno za chladičem taveniny a před statickým mixérem. Teplotní čidla TC1 a TC2 jsou taveninové. Jejich špičky, tedy měřící části, jsou téměř ve středu tokového kanálu, a tudíž měří přímo teplotu taveniny. Čidlo TC1 je umístěno před chladičem taveniny. Naproti tomu teplotní čidlo TC2 je



umístěno na konci statického mixéru. Toto umístění teplotních čidel je vhodné z toho důvodu, že je možné sledovat teplotu taveniny před a za chladičem taveniny.

Tabulka 6: *Nastavené teploty na jednotlivých zónách*

	Z1	Z2	Z3	T1	Z4	Z5	Z6	T2	T3	T4	T5
NASTAVENÁ TEPLOTA [°C]	150	150	150	125	125	120	115	100	100	100	100

Jako zkušební těleso byl zvolen hranol o rozměrech 22×28 mm, obrázek 13, u kterého byly sledovány rozměry, objemová hmotnost jednotlivých vzorků, velikost cel a procesní parametry PR1 a PR2, TC1 a TC2 a výtoková rychlost. Výtoková rychlost byla odladěna na takzvaný rozměr volného výtoku. Tedy taková odtahová rychlost, která odpovídá výtokové rychlosti.



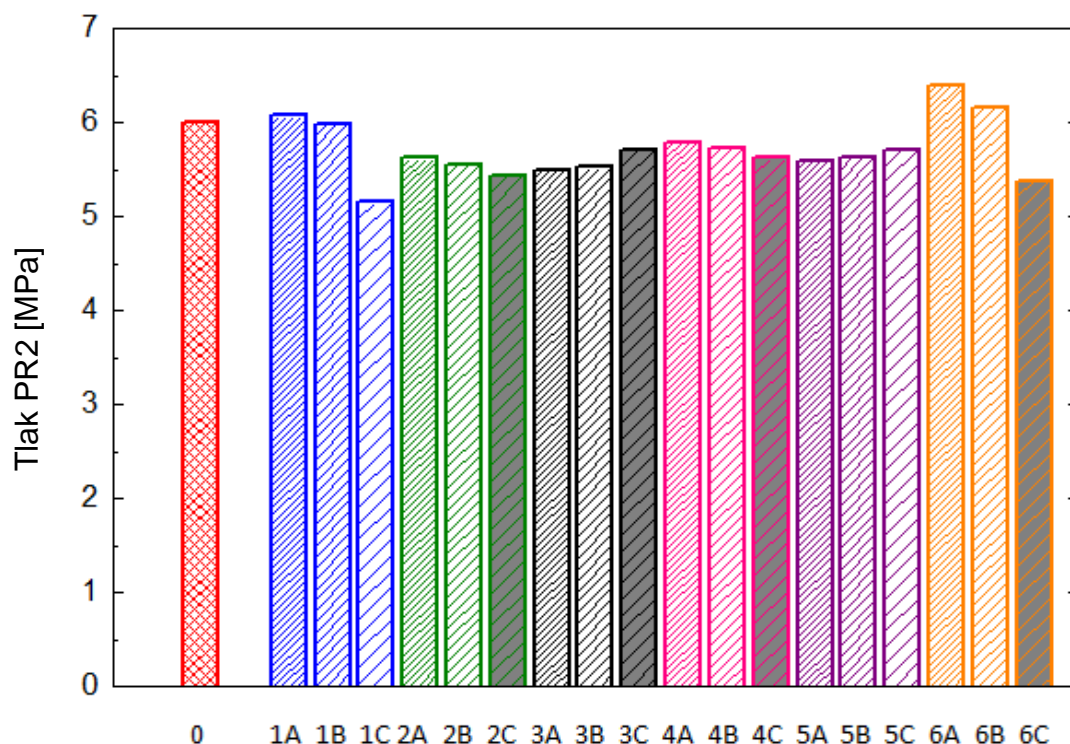
Obr. 13: *Zkušební těleso*

Celkem bylo zkoušeno šest typů vzorků retardérů o třech různých koncentracích. Vzorky jsou označeny čísly 1 – 6. Sledované koncentrace byly 6, 12 a 18 hm %, a v následujících tabulkách a grafech jsou uváděny tyto koncentrace pod písmeny A, B a C, kdy toto značení znamená A–6 hm. %, B–12 hm. %, C–18 hm. %. Vzorky bez použití retardéru jsou označeny číslem 0.

Tabulka 7: Změny procesních parametrů pro všechny typy a koncentrace retardérů

Vzorek	PR1 [MPa]	PR2 [MPa]	TC1 [°C]	TC2 [°C]	Volný výtok[m/min]
0	8,26	6,00	121,6	104,8	29,2
1A	7,93	6,07	120,4	104,1	29,0
1B	7,41	5,98	119,8	103,9	29,0
1C	6,92	5,15	119,3	103,7	30,0
2A	8,02	5,62	120,0	104,0	33,0
2B	7,61	5,55	119,7	104,1	35,0
2C	7,59	5,43	119,6	104,1	36,0
3A	7,79	5,49	119,9	104,2	31,0
3B	7,48	5,52	119,5	104,1	31,4
3C	7,15	5,71	119,7	104,0	32,6
4A	7,95	5,79	120,2	104,1	32,4
4B	7,93	5,73	120,0	104,1	34,0
4C	7,53	5,62	119,5	103,9	37,0
5A	8,01	5,59	120,1	104,1	31,0
5B	7,85	5,63	120,0	104,2	30,0
5C	7,30	5,71	119,4	104,0	29,6
6A	8,18	6,40	125,0	103,4	33,0
6B	8,06	6,16	124,8	103,3	35,2
6C	7,45	5,38	124,4	103,1	37,8

Z tabulky 7 jsou nejdůležitějšími parametry hodnoty PR2 a TC2. Tlak PR2 je důležitý z hlediska kritického tlaku a teplota TC2 odpovídá teplotě výstupní taveniny, která musí ležet uvnitř procesního okna. Vzhledem k tomu, že se teplota TC2 lišila pouze o 2 °C, byla v grafu 1 znázorněna pouze změna tlaku PR2.



Graf 1: Závislost tlaku PR2 na typu a koncentraci retardéru

Přídavek retardéru hoření ve vyšší koncentraci měl negativní vliv na zpracovatelnost. Z tohoto důvodu jsou v následujících grafech některé hodnoty vykresleny s šedým pozadím. Tyto výsledky budou dále konzultovány v kapitole 7.

Pro přehlednost a lepší orientaci byla každému vzorku přiřazena jedna barva. Barevné rozdělení je uvedeno v tabulce 8 a dále dodržováno v celé studii.

Tabulka 8: Barevné označení vzorků

vzorek 0	<b>Červená</b>
vzorek 1	<b>Modrá</b>
vzorek 2	<b>Zelená</b>
vzorek 3	<b>Černá</b>
vzorek 4	<b>Růžová</b>
vzorek 5	<b>Fialová</b>
vzorek 6	<b>Oranžová</b>

## 6 CHARAKTERIZACE VZORKŮ RETARDÉRŮ HOŘENÍ

Cílem charakterizace vybraných vzorků retardérů hoření bylo zjistit typ a obsah aktivní látky. K tomu byly použity následující metody: rentgenová fluorescence (XRF), infračervená spektroskopie (FTIR), termogravimetrická analýza (TGA) a diferenční snímací kalorimetrie (DSC).

### 6.1 Rentgenová fluorescence

Jedná se o metodu, která slouží ke zjištění prvkového složení materiálu. Nevalenční elektrony jednotlivých atomů jsou nabuzeny primárním rentgenovým zářením, a tím jsou nuceny k přeskočení do vyšší slupky. Uvolněné místo je obsazeno jiným elektronem, který při změně stavu vyžáří energii ve formě sekundárního rentgenova záření. Elektrony jednotlivých prvků emitují charakteristické rentgenové záření a tím je lze s přesností určit. [29]

Měření byla provedena na Quant'X EDXRF Analyzer Spetrometru (Thermo Fisher Scientific, USA). V tabulce 9 jsou uvedeny výsledky prvkového složení jednotlivých masterbatchí. Pozornost byla upřena na dominující prvky. U většiny vzorků se ovšem objevily i další prvky jako fosfor, zinek, indium, hliník, cín a jiné, ovšem tyto prvky se objevily pouze v zanedbatelné koncentraci. Naměřené množství bylo pod 1 hm. %, proto nejsou uvedeny. Může se jednat o zbytky katalyzátorů nebo jiné nečistoty. Nelze tedy s přesností určit, zda mají na retardaci nějaký vliv nebo ne.

Tabulka 9: XRF analýza vzorků retardérů

	Prvek	Hmotností zastoupení prvku [hm. %]	Směrodatná odchylka	Prvek	Hmotností zastoupení prvku [hm. %]	Směrodatná odchylka
Vzorek 1	Cl	65,4	0,2	Sb	34,4	0,2
Vzorek 2	Br	58,9	0,3	Sb	40,6	0,2
Vzorek 3	Cl	54,1	0,3	Sb	45,5	0,3
Vzorek 4	Br	65,2	0,2	Sb	30,2	0,2
Vzorek 5	Cl	70,4	0,2	Sb	26,7	0,2
Vzorek 6	Br	66,2	0,2	Sb	31,3	0,2

Určujícím výsledkem analýzy bylo, zda se jedná o látky na chlorované nebo bromované bázi a jestli je přítomná synergická látka. Měření ukázalo, že vzorky 1, 3 a 5 jsou chlorované a jako synergická látka zde slouží oxid antimonitý. Nejvíce chloru je vzorku 5. Naproti tomu jsou vzorky 2, 4 a 6 bromované a jako synergická látka slouží opět oxid antimonitý. Nejvíce bromu je obsaženo ve vzorku 6.

## 6.2 Diferenční snímací kalorimetrie

DSC je metoda, u které přístroj porovnává tepelný tok mezi prázdným kelímkem a kelímkem se vzorkem. Z výsledné křivky při měření na DSC je možné zjistit teplotu tání, teplotu krystalizace a další parametry. U semikrystalických polymerů jsou patrné dvě možné odchylky od základní linie. Při ohřevu se křivka prohne směrem k endotermické straně osy a při chlazení směrem k exotermické straně. Tyto prohnutí křivky jsou způsobeny teplotami tání, respektive krystalizace. Naměřené hodnoty jsou silně závislé na teplotním programu [30].

Měření na DSC bylo provedeno na zařízení DSC1 (Mettler Toledo, Švýcarsko) v následujícím režimu:

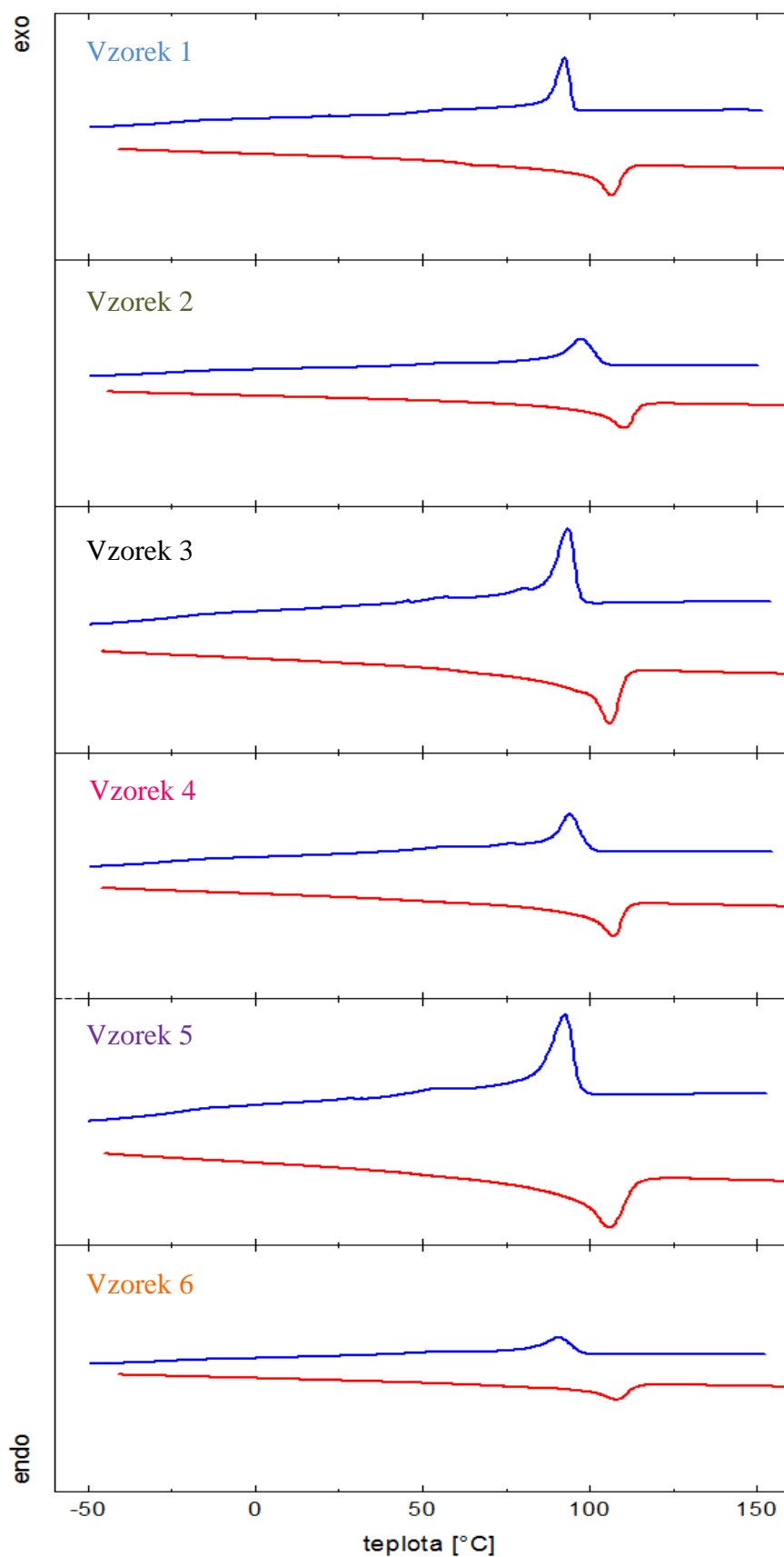
1. ohřev:  $-80\text{ °C} - 160\text{ °C}$ ,  $50\text{ °C/min}$

1 chlazení:  $160\text{ °C} - -50\text{ °C}$ ,  $-20\text{ °C/min}$

2. ohřev:  $-50\text{ °C} - 160\text{ °C}$ ,  $20\text{ °C}$

2. chlazení:  $160\text{ °C} - -50\text{ °C}$ ,  $-20\text{ °C/min}$

Všechna měření byla provedena v ochranné atmosféře dusíku o průtoku  $30\text{ mm/min}$ , kdy 1. ohřev a 1. chlazení měly za úkol smazat předchozí teplotní historii vzorku. Z 2. průběhů ohřevů a chlazení pak byla provedena analýza vzorků. Cílem měření bylo určit typ polymerního nosiče retardéru hoření. Naměřené teploty tání a krystalizace jsou uvedeny v tabulce 10. a grafu 2. Z naměřených výsledných je patrné, že jako nosič bylo použito LDPE.



Graf 2: DCS křivky jednotlivých vzorků masterbatchů, červeně vyznačená je křivka tání, modře vyznačené je křivka krystalizace

Tabulka 10: Teploty tání a krystalizace všech vzorků

	Teplota tání [°C]	Teplota krystalizace [°C]
Vzorek 1	107	92
Vzorek 2	110	97
Vzorek 3	108	93
Vzorek 4	107	94
Vzorek 5	106	92
Vzorek 6	106	91

### 6.3 Termogravimetrická analýza

TGA podobně jako DSC patří do skupiny termických analýz. Udává hmotnostní změnu vzorku v závislosti na teplotě. Tato hmotnostní změna je způsobena tepelnou degradací vzorku nebo jeho částí, v případě směsi. Vzorek je umístěn do kelímku napojeného na váhu. Celá sestava kelímku a váhy je pak umístěna v temperované peci. [30]

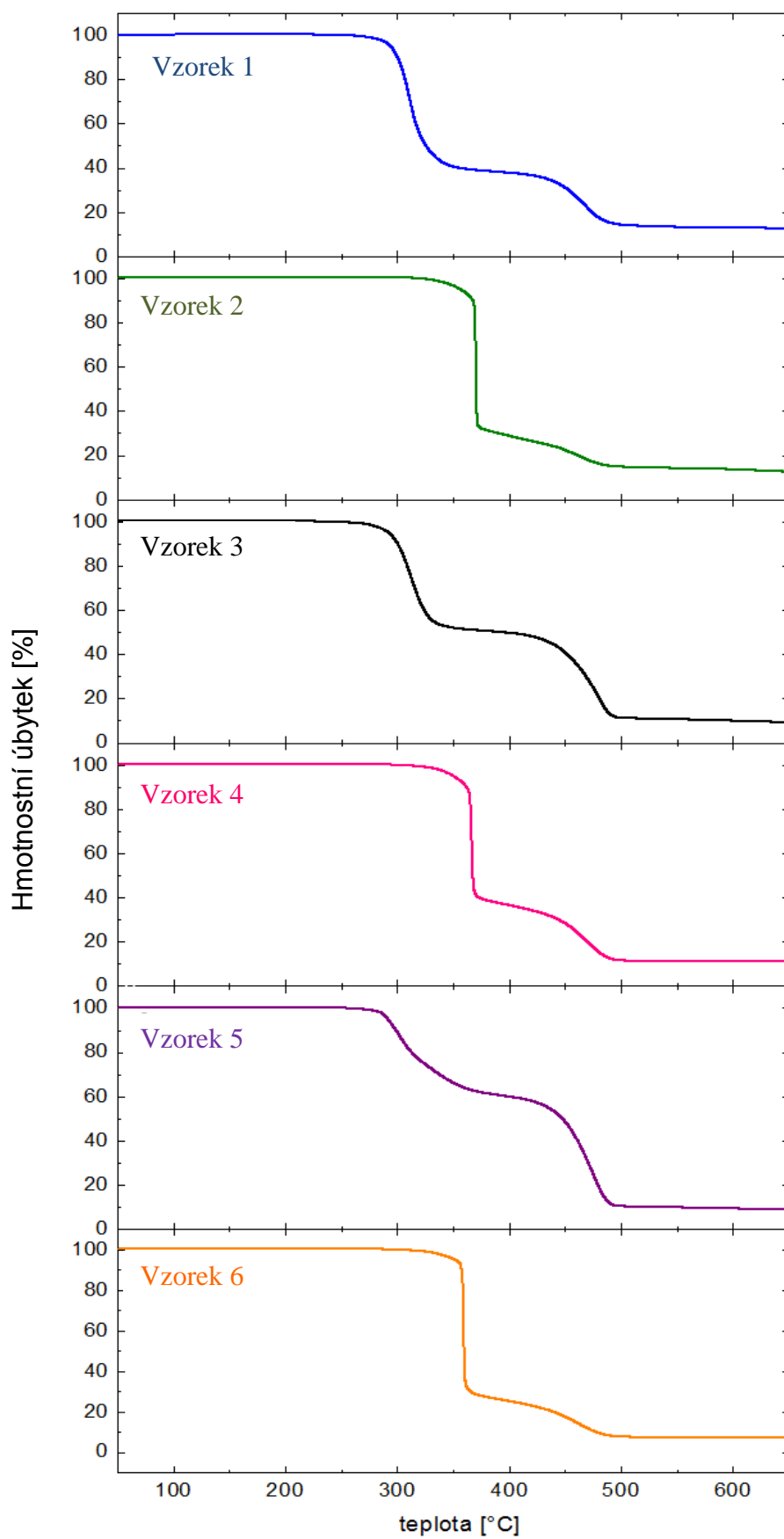
Měření bylo provedeno na zařízení TGA Q50 (TA INSTRUMENT, USA) v teplotním režimu 30 °C – 650 °C, rychlostí 10 °C. Po celou dobu měření byl vzorek v ochranné atmosféře dusíku o průtoku 100 ml/min.

Metoda byla zvolena jednak s cílem stanovit podíl retardační složky v masterbatchi a také zjistit teplotu, při které začne rozkládat. Výsledky z TGA analýzy jsou popsány v tabulce 11 a znázorněny v grafu 3.

Tabulka 11: TGA analýza všech vzorků retardérů hoření

	1. pík		2. pík		Zbytek
	Hmotnostní podíl [hm. %]	Teplota degradace [°C]	Hmotnostní podíl [hm. %]	Teplota degradace [°C]	Hmotnostní podíl [hm. %]
Vzorek 1	62	236	25	383	14
Vzorek 2	74	304	12	419	15
Vzorek 3	50	215	40	379	11
Vzorek 4	63	287	26	389	11
Vzorek 5	44	221	48	390	9
Vzorek 6	73	291	19	384	7





Graf 3: TGA křivky jednotlivých vzorků masterbatchí

TGA analýza ukázala, že největší podíl retardační složky je vzorku 2 a nejméně ve vzorku 3. Vliv zastoupení retardačních složek bude diskutován při vyhodnocení zkoušek hořlavosti.

## 6.4 Infračervená spektroskopie

FTIR je metoda, při které vzorkem prochází paprsek infračerveného světla, který je absorbován a tím dochází ke změnám rotačně-vibračních energetických stavů molekuly. Výstupem je IČ spektrum, obsahující absorpční pásy, kdy každý odpovídá jisté funkční skupině. Pásy v oblasti  $1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$  jsou nazývané oblastí „otisku palce“, která slouží identifikaci sledovaného materiálu. [31]

Měření byla provedena na FTIR Spektrometru Nicolet Avatar TM 320 E.S.P.TM (Thermo Fisher, USA) v rozsahu  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ .

Sledovány byly měřeny granule čistého masterbatche, a také jeho zbytky po vyžhání v muflové peci. Vzhledem k převažující složce anorganických látek by bylo vhodnější měřit v tzv. vzdálené oblasti FTIR. Takto docházelo k překryvu jednotlivých pásem a bylo těžké provést přesnou analýzu vzorku. Přesto se podařilo určit typ polymerního nosiče jako LDPE, což koreluje s výsledky DSC měření. Dále se podařilo rozdělit retardéry na bromované a chlorované, a potvrdit tak XRF analýzu.

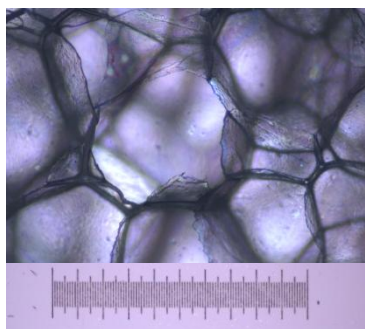
## 7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Nejprve byl sledován vliv přidavku retardéru hoření na tvar a strukturu vytlačované pěny a následky posouzen jeho vliv na hořlavost.

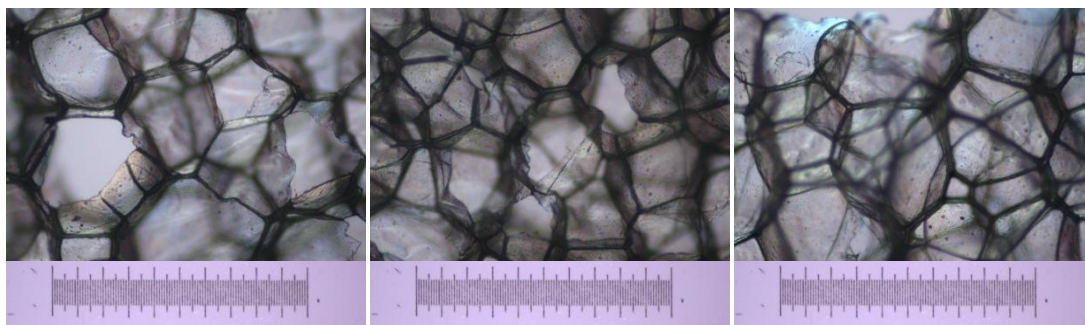
### 7.1 Měření velikosti cel

V kapitole 2.3, bylo pojednáváno o nukleaci pěny pomocí nukleačních činidel a pomocí tlaku. Jak je patrné z grafu 2, tlak PR2 se zvýšil pouze u vzorků 1A, 6A a 6B. Protože by se dalo u nich předpokládat zmenšení velikosti cel. Jenže ke zmenšení došlo i u dalších vzorků, což bylo patrné pouhým okem. Na zmenšení cel se tedy zřejmě podílela další látka obsažená v retardačním systému. Touto látkou by mohl být oxid antimonitý, anebo další anorganické látky, které zapůsobily jako nukleační činidla.

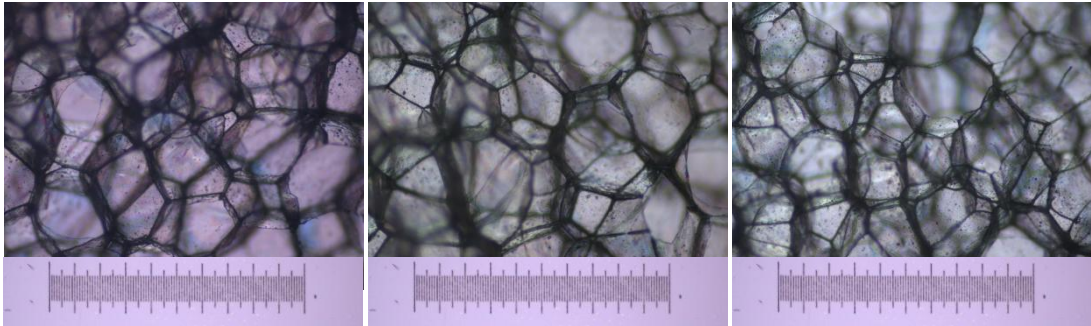
Z vytlačených vzorků byly připraveny mikrořezy, které byly následně sledovány pod optickým mikroskopem. Struktura jednotlivých vzorků je prezentována na obrázcích 14 – 20. Vzhledem k tomu, že od každého vzorku byl pořízen pouze jeden snímek nelze velikost cel statisticky vyhodnotit, přesto je patrný vliv typu retardačního systému a jeho koncentraci. Měřítka odpovídá délce 1 mm.



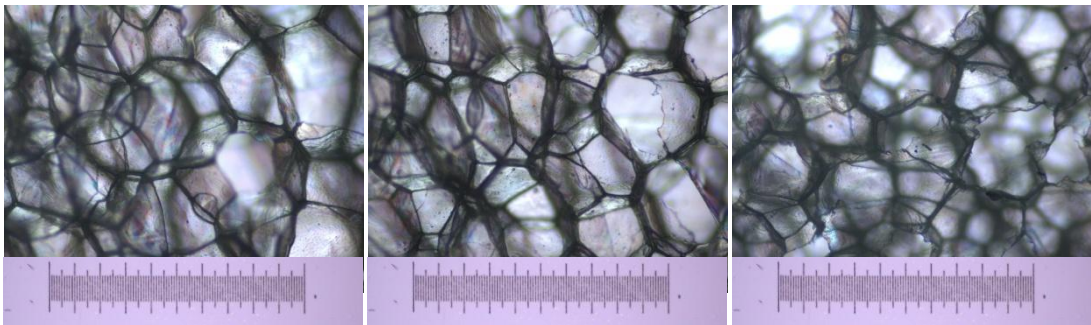
Obr. 14: Velikost cel srovnávacího vzorku 0



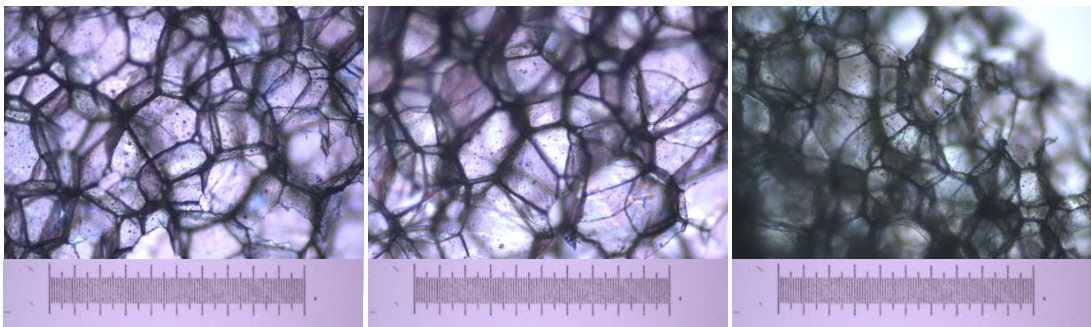
Obr. 15: Velikost cel vzorku 1A (vlevo), 1B (uprostřed), 1C (vpravo)



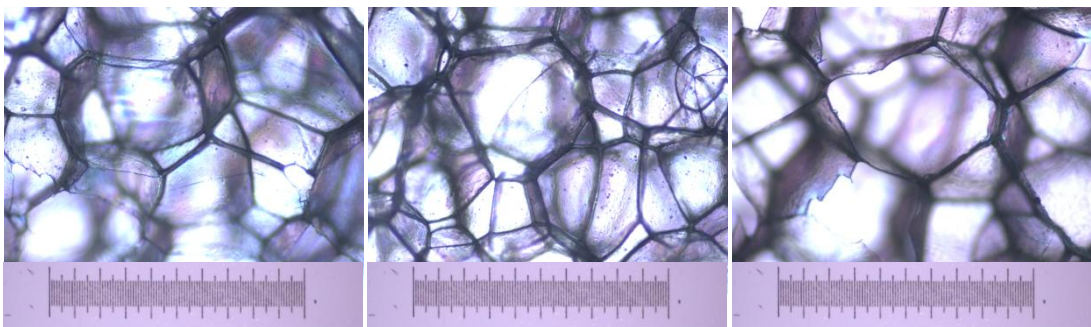
Obr. 16: Velikost cel vzorku 2A (vlevo), 2B (uprostřed), 2C (vpravo)



Obr. 17: Velikost cel vzorku 3A (vlevo), 3B (uprostřed), 3C (vpravo)

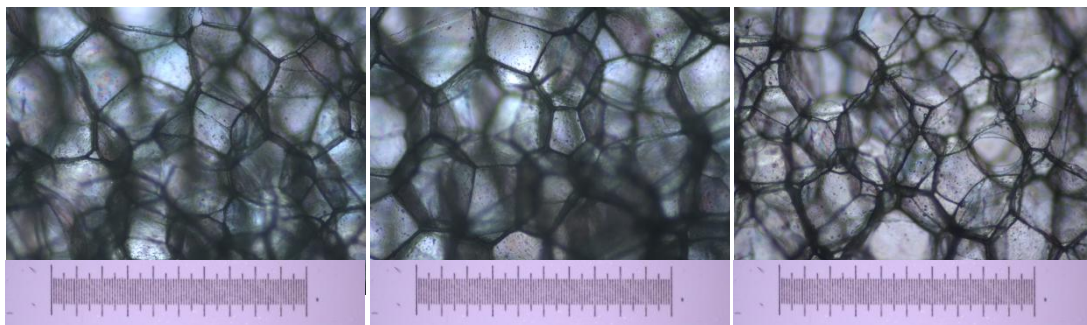


Obr. 18: Velikost cel vzorku 4A (vlevo), 4B (uprostřed), 4C (vpravo)



Obr. 19: Velikost cel vzorku 5A (vlevo), 5B (uprostřed), 5C (vpravo)

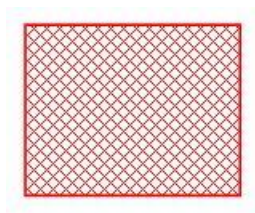




Obr. 20: Velikost cel vzorku 6A (vlevo), 6B (uprostřed), 6C (vpravo)

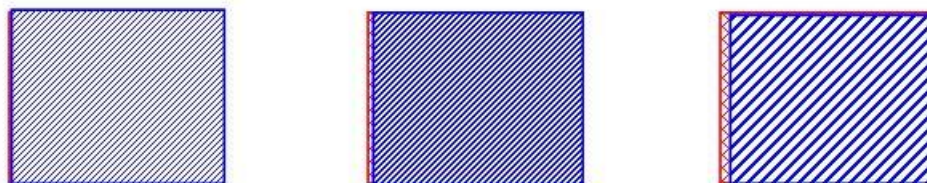
## 7.2 Měření rozměrů a objemové hmotnosti

U všech vzorků byly také sledovány změny rozměrů a vypočítaná jejich objemová hmotnost. Rozměry jednotlivých vzorků se od srovnávacího tělesa lišily. Tato změna je způsobena různou velikostí cel, jak je patrná ze snímků v předchozí kapitole 7.1. Graficky je tato změna znázorněna na obrázcích 21 – 27, kdy výchozí rozměry srovnávacího vzorku jsou vždy na pozadí.

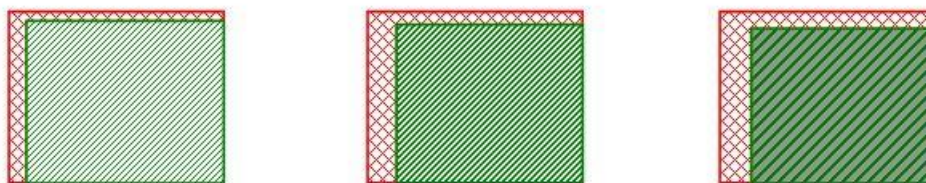


Obr. 21: Rozměr

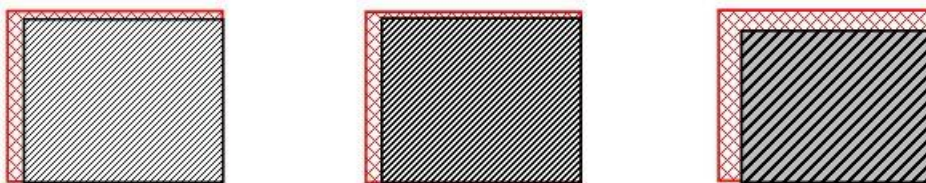
*srovnávacího vzorku 0*



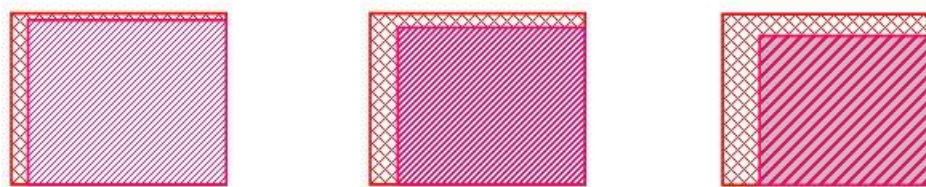
Obr. 22: Změna rozměrů vzorku 1A (vlevo), 1B (uprostřed) a 1C (vpravo)



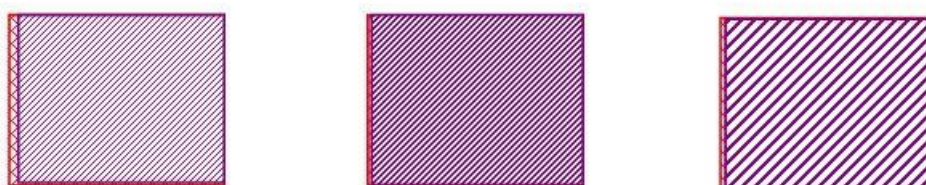
Obr. 23: Změna rozměrů vzorku 2A (vlevo), 2B (uprostřed) a 2C (vpravo)



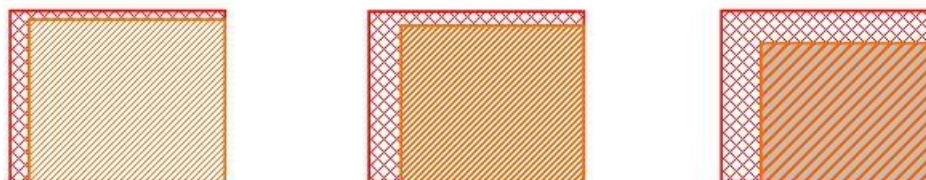
Obr. 24: Změna rozměrů vzorku 3A (vlevo), 3B (uprostřed) a 3C (vpravo)



Obr. 25: Změna rozměrů vzorku 4A (vlevo), 4B (uprostřed) a 4C (vpravo)



Obr. 26: Změna rozměrů vzorku 5A (vlevo), 5B (uprostřed) a 5C (vpravo)



Obr. 27: Změna rozměrů vzorku 6A (vlevo), 6B (uprostřed) a 6C (vpravo)

Z obrázků 21 – 27 je patrné, že vzorky 1 a 5 se svými rozměry příliš nelišily od srovnávacího vzorku. Protože obsah synergické látky je u všech vzorků přibližně stejný, je zřejmě synergická látka ve formě různě velkých částic, které mohou odlišně nukleovat. U všech ostatních vzorků se rozměry se vzrůstající koncentrací téměř konstantně zmenšovaly.

V tabulce 12 je spočítáno zmenšení dle rovnice:

$$z = \frac{S}{S_0} = \frac{a \cdot b}{a_0 \cdot b_0} \quad (14)$$

kde:  $z$  – zmenšení vzorku [-]

$S$  – průřez vzorku [ $\text{mm}^2$ ]

$S_0$  - průřez vzorku bez retardéru [ $\text{mm}^2$ ]

$a, b$  – rozměry vzorku [mm]

$a_0, b_0$  – rozměry vzorku bez retardéru [mm]

Tabulka 12: Změna průřezu vzorků proti srovnávacímu vzorku

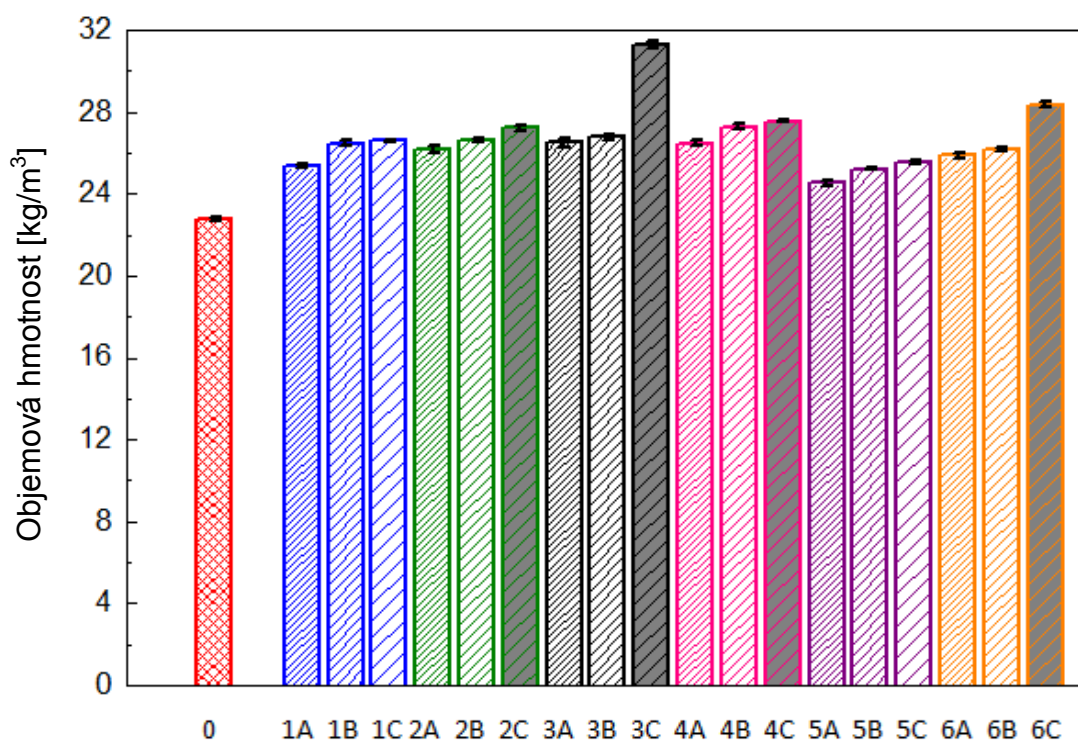
Koncentrace retardéru	Relativní změna průřezu		
	A	B	C
Vzorek 0	1		
Vzorek 1	1	0,98	0,94
Vzorek 2	0,87	0,81	0,77
Vzorek 3	0,88	0,89	0,79
Vzorek 4	0,89	0,80	0,72
Vzorek 5	0,94	0,98	0,97
Vzorek 6	0,87	0,80	0,66

Z tabulky 12 je patrné, že se vzorky 2C, 3C, 4C a 6C zmenšily o více než 20 %. Tuto hranici již lze považovat za neprocesní.

Vedle změny rozměrů byla sledována změna objemové hmotnosti. Ta byla spočítána na 0,001 g. Všechny hodnoty jsou uvedeny v příloze PI. Objemové hmotnosti byly spočítány dle rovnice 14.

$$\rho = \frac{m/1000[g]}{a/1000[mm] \cdot b/1000[mm] \cdot c/1000[mm]} [kg \cdot m^3] \quad (14)$$

Změna objemové hmotnosti na koncentraci retardéru je pak graficky znázorněna v grafu 4.



Graf 4: Závislost objemové hmotnosti na typu a koncentraci retardéru

U všech vzorků došlo ke zvýšení objemové hmotnosti, s rostoucí koncentrací retardéru hoření.

### 7.3 Měření hořlavosti vzorků

Cílem této studie bylo posouzení vlivu retardérů hoření na snížení hořlavosti. Tento parametr byl hodnocen podle následujících norem:



ČSN EN 13 501-1 Požární kvalifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb na oheň – Část 1: Kvalifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Tato norma člení výrobky do 7 kategorií dle reakce na oheň. Tyto kategorie jsou seřazeny v pořadí od nejhorší: F, E, D, C, B, A<sub>2</sub> a A<sub>1</sub>.

Vzhledem k tomu, že obě kategorie A jsou nedosažitelné již z principu, protože do těchto kategorií patří materiály, které vůbec nepřispívají k hoření jako například sklo a beton, bylo cílem měření pěny s retardérem hoření začlenit do skupin F až B. Nicméně vlastní měření se provádí podle dalších norem, které jsou v této normě popsány. Jedná se především o tyto dvě normy:

ČSN EN ISO 11 925-2 Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene, ČSN EN 13 823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň - Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu.

Protože norma ČSN EN 13 823 vyžaduje speciální zařízení, které bylo nedostupné, bylo postupováno pouze dle normy ČSN EN ISO 11 925-2. Z tohoto důvodu nelze přesně zařadit pěny do jiné kategorie než E, protože u skupin D až B je vyžadována zkouška podle normy ČSN EN 13 823 [32 – 34]. Z tohoto důvodu byly provedeny další měření podle norem UL94HB a UL94V.

Jak již bylo zmíněno, vzorky měly rozdílné rozměry, díky vlivu retardéru hoření. Proto jsou všechny naměřené hodnoty hořlavosti uvedeny jak ve skutečných hodnotách, tak i v korigovaných hodnotách na skutečný průřez. Korigovaná hodnota byla spočítána podle rovnice 15.

$$k = H \cdot z \quad (15)$$

kde:  $k$  – korigovaná hodnota

$H$  – naměřená hodnota

$z$  - zmenšení

Všechny zkoušky hořlavosti byly provedeny vždy na 5 zkušebních tělesech, jak je předepsáno v jednotlivých normách.

### 7.3.1 Měření dle normy ČSN EN ISO 11 925-2

Norma předepisuje, jak nastavení vzdáleností plamene od zkušební vzorku a jeho úhel, tak velikost plamene. Při měření byl zkoušený vzorek zapalován 40 mm nad spodní hranu zkušební tělesa po dobu 15 s. Protože norma dovoluje zkoušet výrobky v podstatě neplošné, jako izolace trubek a profily, nebyl zkušební vzorek před zkouškou nijak upravován. Celková délka zkušební tělesa byla 250 mm. Kondicionování bylo prováděno při teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 53 %. Doba kondicionování trvala 72 hod. [33]

U vzorků byly sledovány tyto parametry:

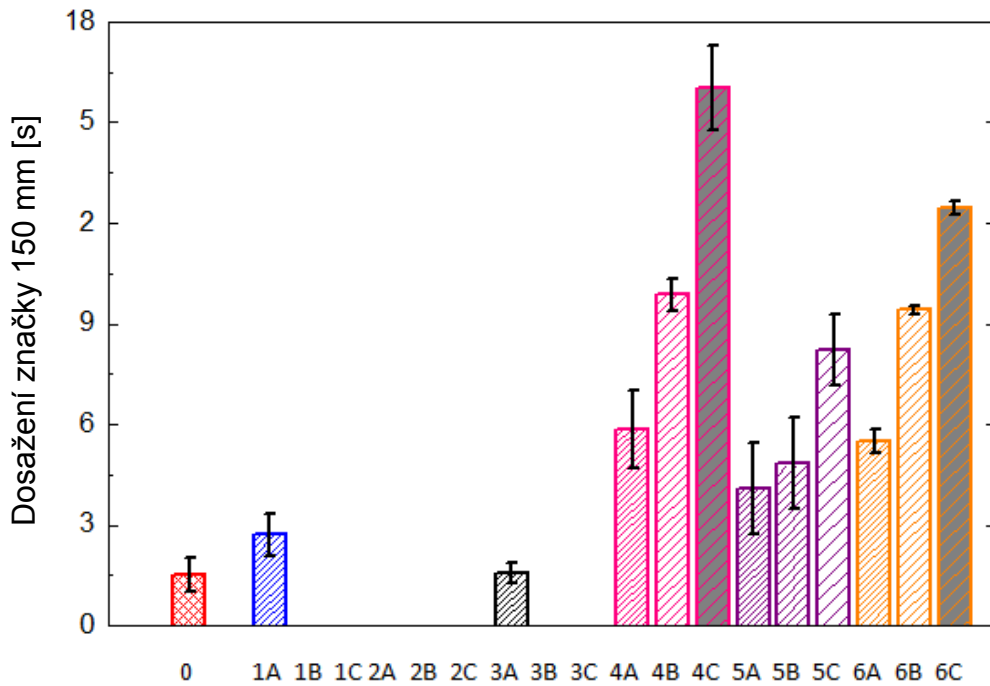
- 1) zda dojde k zapálení vzorku,
- 2) zda špička plamene dosáhne 150 mm nad místem působení plamene a čas, ve kterém k tomu dojde,
- 3) přítomnost plamenně hořících kapek/částic, které způsobí zapálení filtračního papíru,
- 4) pozorování chování zkoušeného zkušební tělesa. [33]



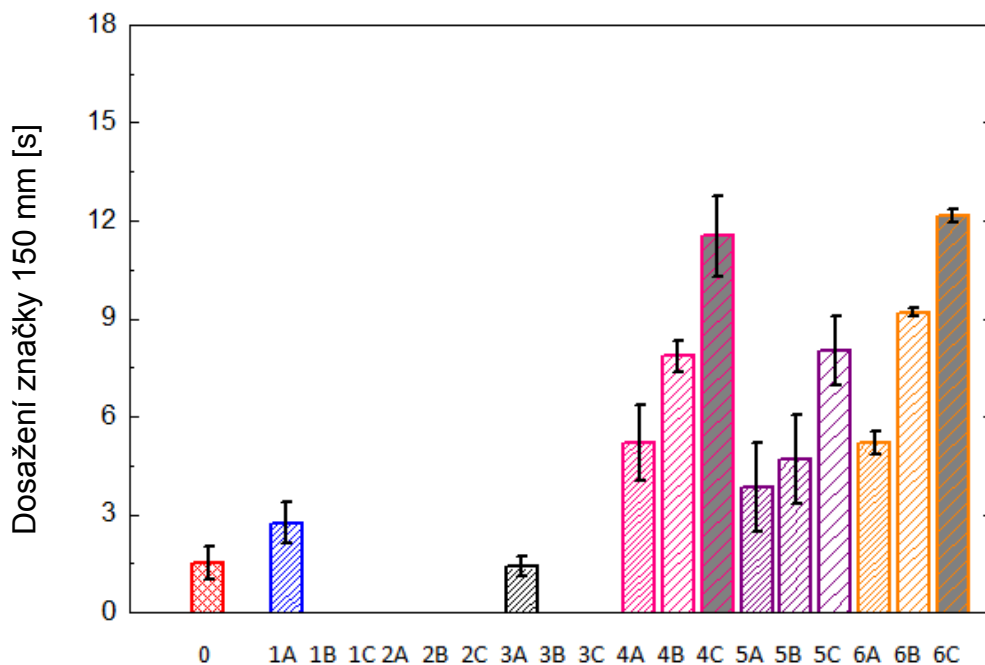
Obr. 28: Ukázka měření podle normy 11 925-2

U všech vzorků došlo k jejich zapálení. Závislost času k dosažení značky 150 mm na koncentraci retardéru je uvedena v grafu 5 a hodnoty korigované na průřez

vzorku v grafu 6. Tvorba plamenně hořících kapek a zapálení papíru včetně všech hodnot jsou uvedeny v příloze PII



Graf 5: Závislost času dosažení značky 150 mm na typu a koncentraci retardéru



Graf 6: Závislost času dosažení značky 150 mm na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty

Tabulka 13: *Přehled skutečných a korigovaných hodnot závislosti času dosažení značky 150 mm*

Vzorek	Naměřená hodnota		Korigovaná hodnota	
	Hodnota	Odchylka	Hodnota	Odchylka
0	1,5	0,5	1,5	0,5
1A	2,7	0,6	2,7	0,6
1B	-	-	-	-
1C	-	-	-	-
2A	-	-	-	-
2B	-	-	-	-
2C	-	-	-	-
3A	1,6	0,3	1,4	0,3
3B	-	-	-	-
3C	-	-	-	-
4A	5,7	1,1	5,2	1,1
4B	9,9	0,4	7,9	0,4
4C	16,0	1,2	11,5	1,2
5A	4,1	1,3	3,8	1,3
5B	4,8	1,3	4,7	1,3
5C	8,2	1,1	8,0	1,1
6A	5,5	0,3	5,2	0,3
6B	9,4	0,1	9,2	0,1
6C	12,5	0,2	12,2	0,2

Z pohledu retardace hořlavosti by jako ideální výsledek bylo nedosažení hranice 150 mm, nebo dosažení této značky v co nejdelším čase. Na základě dosažených výsledků se jako nejefektivnější retardér hoření se ukázal vzorek 2, který nedosáhl značky 150 mm ani pro jednu koncentraci retardéru hoření. Také jako jediný ve všech koncentracích nezapálil filtrační papír. Jako nejhorší se naopak ukázal vzorek 3A, který při korigované hodnotě paradoxně dopadl hůře než srovnávací vzorek. Zajímavé je také to, že další koncentrace vzorku 3 již kontrolní značky 150 mm nedosáhly.

### 7.3.2 Měření dle normy UL94HB

UL94HB byla zvolena především pro svou jednoduchost a relativní nenáročnost na zkušební zařízení. Výška umístění vzorku, velikost plamene a sklon hořáku byly opět nastaveny dle požadavků v normě. Vzorky byly umístěny v horizontální poloze. Zkušební těleso bylo 250 mm dlouhé jako v případě normy ČSN EN ISO 11 925. Při

této zkoušce byla špička zkušebního plamene umístěna na hranu spodní části zkušebního tělesa [35 – 36].

Byly sledovány tyto parametry [35 – 36]:

- 1) čas k dosažení první značky 25 mm od kraje,
- 2) čas hoření od první značky po uhašení nebo po dosažení značky 100 mm od kraje,
- 3) poškozená délka,
- 4) zda zkušební těleso odkapává,
- 5) rychlost hoření v mm/min počítaná dle vztahu 13:

$$v = 60 \frac{L}{t} \quad (13)$$

kde,

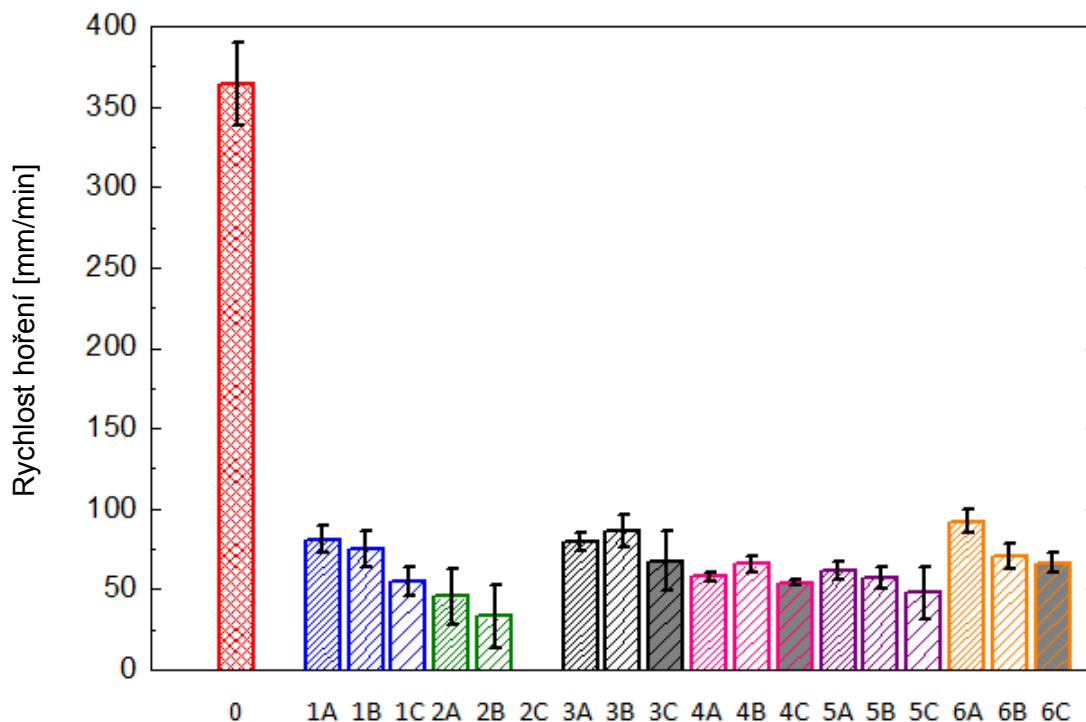
$v$  = rychlost hoření [mm/min],  $L$  = poškozená délka [mm],  $t$  = čas hoření od první značky po uhašení nebo po dosažení značky 100 mm [s]



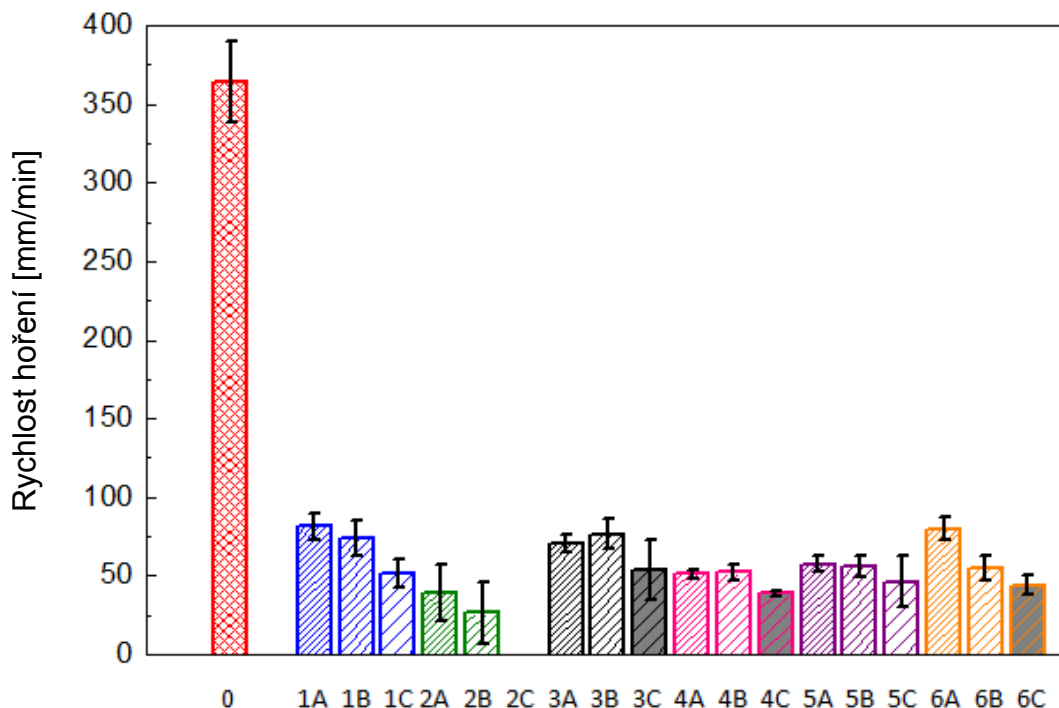
Obr. 29: Ukázka měření podle normy UL94HB

U všech sledovaných vzorků došlo k jejich zapálení. Závislost rychlosti hoření na koncentraci retardéru ve vzorku je uvedena v grafu 7 a hodnoty korigované na průřez

v grafu 8. Čas k dosažení první značky, čas k dosažení druhé značky nebo k uhašení vzorku, a jestli zkušební těleso odkapává, jsou uvedeny v příloze PIII.



Graf 7: Závislost rychlosti hoření na typu a koncentraci retardéru



Graf 8: Závislost rychlosti hoření na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty

Tabulka 14: *Přehled skutečných a korigovaných hodnot rychlosti hoření*

Vzorek	Naměřená hodnota		Korigovaná hodnota	
	Hodnota	Odchylka	Hodnota	Odchylka
0	360	30	360	30
1A	81	9	82	9
1B	75	11	74	11
1C	55	9	52	9
2A	46	18	40	18
2B	33	20	27	20
2C	-	-	-	-
3A	80	5	71	5
3B	86	11	77	11
3C	68	19	54	19
4A	58	3	52	3
4B	66	5	52	5
4C	54	2	39	2
5A	62	5	58	5
5B	57	6	56	6
5C	48	16	46	16
6A	92	7	80	7
6B	71	8	55	8
6C	66	6	44	6

Z pohledu zkoušky UL94HB se jako nejlepší retardér vzorek 2, který měl opět nejvyšší retardační účinnost. Už při dávkování 6 hm. % vykazoval snížení rychlosti hoření o 89 % oproti srovnávacímu vzorku. Dávkování ve vyšších koncentracích pak dosáhlo ještě lepších výsledků.

Oproti srovnávacímu vzorku dopadl nejhůře vzorek 1A. Avšak i jako nejhorší vzorek vykazuje zlepšení o 78 %. Rozdílnost v účinnosti retardérů hoření se pohybuje v rozmezí 15 %, což při tak rozdílných dávkováních nejsou tak zásadní rozdíly.

### 7.3.3 Měření dle normy UL94V

Zkouška UL94V navazuje, pokud jí vzorek úspěšně projde, na zkoušku UL94HB. Jedná se o zkoušku, u které je zkušební těleso umístěno vertikálně. Výška umístění vzorku, velikost plamene a sklon hořáku byly nastaveny dle parametrů uvedených v normě. Délka zkušebního tělesa byla 250 mm. Kondicionování probíhalo dle

stejných podmínek jako při měření dle normy 11 925-2. Při tomto měření byla špička zkušebního plamene umístěna opět na spodní část zkušebního tělesa [35 – 36].

Pro vyhodnocení byly sledovány tyto parametry:

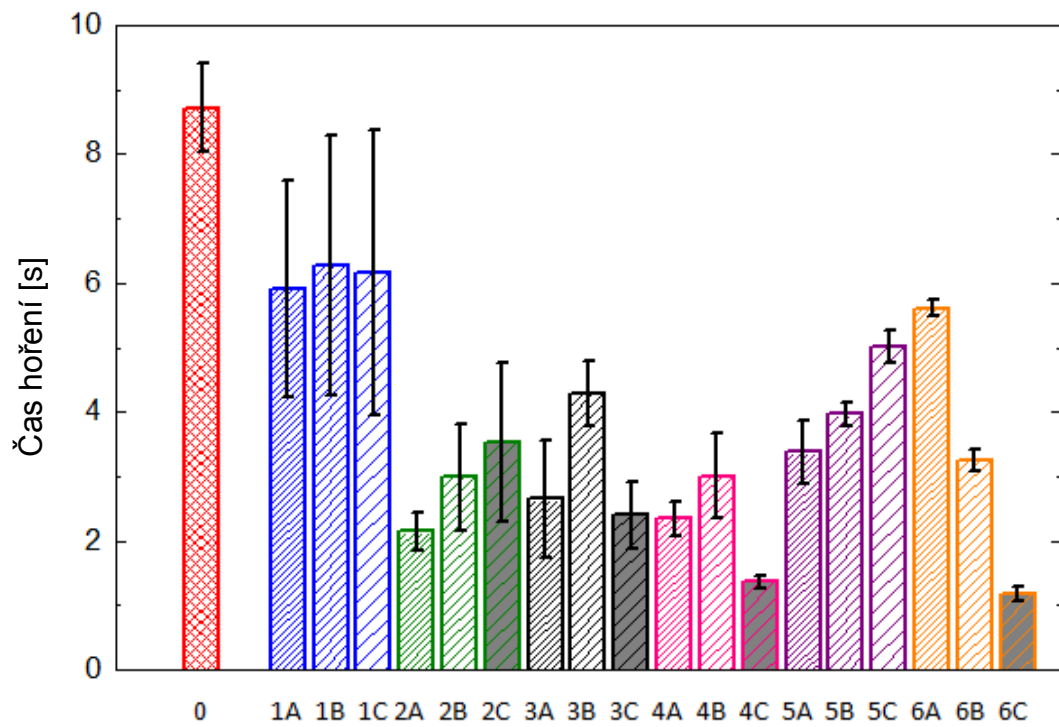
- 1) doba hoření po 10 s zapalování,
- 2) zda zkušební těleso odkapává,
- 3) zda dojde k zapálení filtračního papíru [35 – 36]



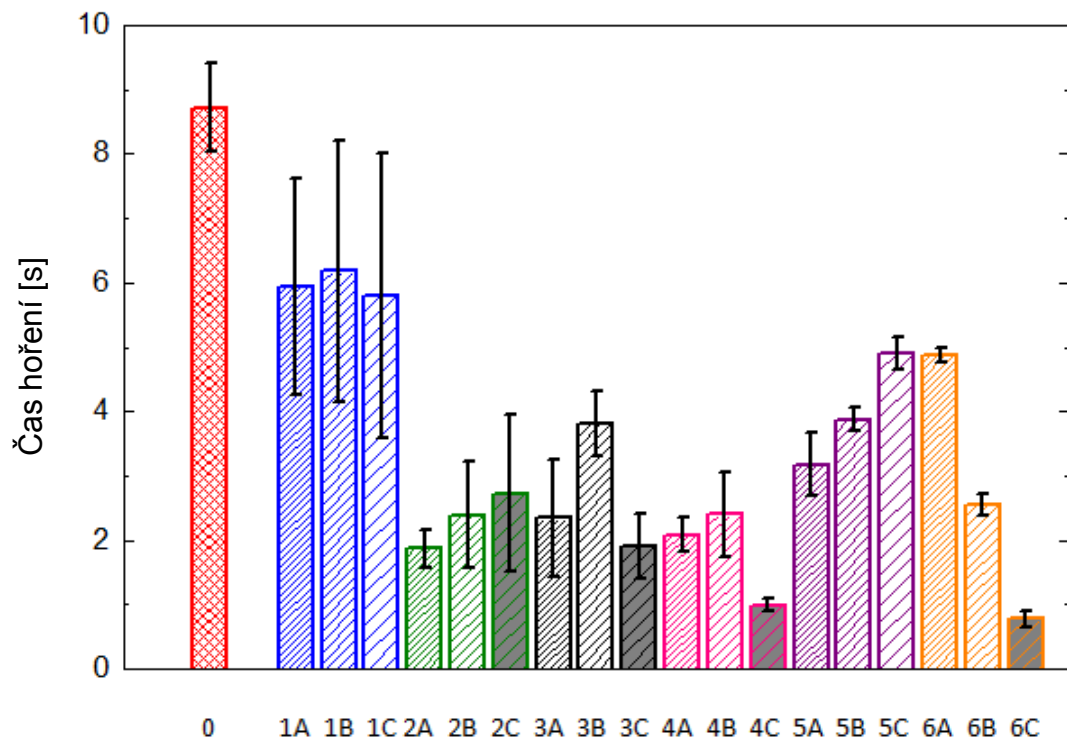
Obr. 30: Ukázka měření podle normy UL94V – pohled zepředu (vlevo), pohled z boku (vpravo)

Závislost času hoření pro jednotlivé vzorky je uvedena v grafu 9 a hodnoty korigované na průřez vzorku v grafu 10. Tabulky s naměřenými hodnotami, a zda došlo k odkapávání a zapálení filtračního papíru, jsou uvedeny v příloze PIV.





Graf 9: Závislost času hoření na typu a koncentraci retardéru



Graf 10: Závislost času hoření na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty

Tabulka 15: *Přehled skutečných a korigovaných hodnot času hoření*

Vzorek	Naměřená hodnota		Korigovaná hodnota	
	Hodnota	Odchylka	Hodnota	Odchylka
0	8,7	0,7	8,7	0,7
1A	5,9	1,6	5,9	1,6
1B	6	2	6,2	2
1C	6	2	5,8	2
2A	2,2	0,3	1,9	0,3
2B	2,9	0,8	2,4	0,8
2C	3,5	1,2	2,7	1,2
3A	2,7	0,9	2,3	0,9
3B	4,3	0,5	3,8	0,5
3C	2,4	0,5	1,9	0,5
4A	2,4	0,3	2,1	0,3
4B	3,0	0,6	2,4	0,6
4C	1,37	0,10	0,99	0,10
5A	3,4	0,5	3,2	0,5
5B	3,9	0,2	3,9	0,2
5C	5,0	0,3	4,9	0,3
6A	5,61	0,12	4,87	0,12
6B	3,26	0,17	2,54	0,17
6C	1,18	0,12	0,78	0,12

Nejkratší čas a tedy největší retardační účinek vykazoval tentokrát vzorek 6C, který vykazoval zlepšení o 90 %. Vzorek je však zcela neprocesní. Nejhorším vzorkem byl 1B, který vykazoval zlepšení pouze o 30 %. Při interpretaci těchto výsledků je však důležité poznamenat, že se bere v úvahu pouze čas hoření a nikoliv k jakému poškození došlo, což značné míry zkresluje hodnocení jednotlivých výsledků.

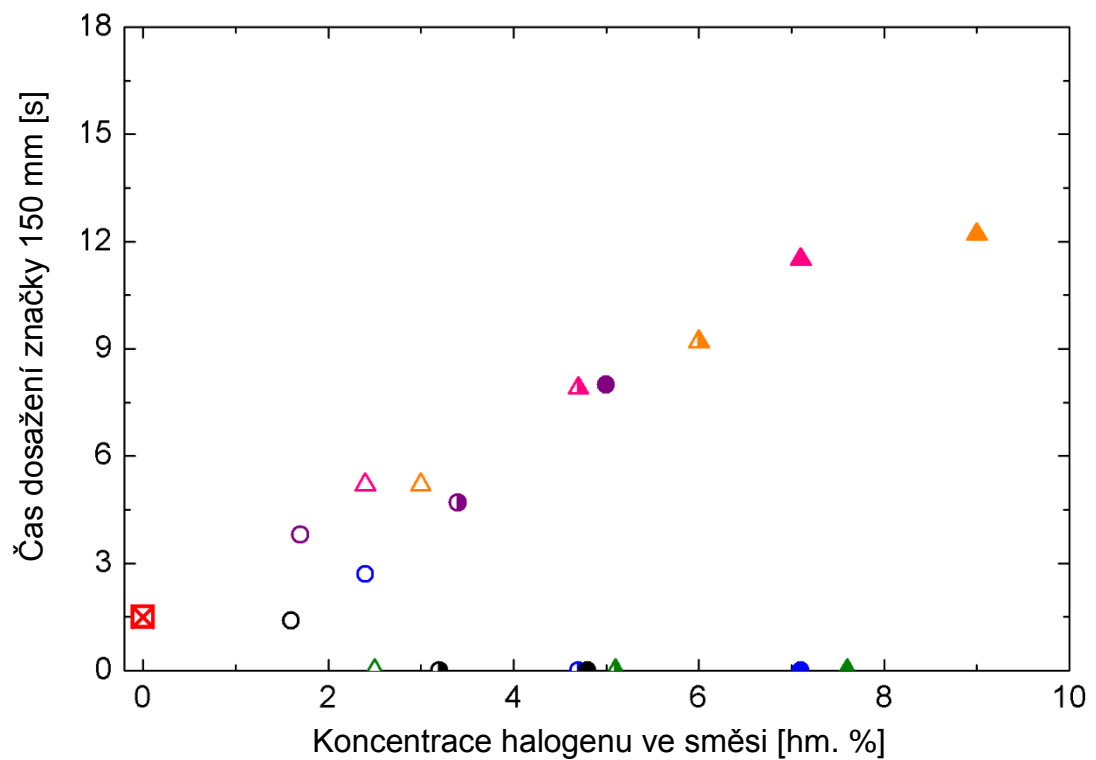
Z doposud uvedených výsledků hořlavosti nelze zcela jasně říct, zda jsou lepší bromované nebo chlorované retardéry hoření. Z toho důvodu byly zkombinovány výsledky z XRF a TGA a stanoveny podíly retardační složky v jednotlivých vzorcích. Protože FTIR analýza popelovin neprokázala žádný oxid antimonitý ani halogen, tak je zřejmé, že všechna účinná látka odpovídá prvnímu hmotnostnímu úbytku na TGA křivek. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 11. Z výsledků XRF analýzy je zřejmý poměr mezi halogenem a antimonem v retardační směsi. Proto byl první hmotnostní úbytek rozdělen mezi obě složky v poměrech získaných z XRF analýzy. Protože XRF analýza

nezaznamenává lehké atomy jako uhlík, vodík a kyslík, nejsou v poměrech započteny žádné uhlovodíky, které jsou nosiči halogenů, což do jisté míry zkresluje množství obou složek. Dá se však předpokládat, že všechny nosiče u chlorovaných a bromovaných retardérů jsou velmi podobné a z toho důvodu jsou všechny výsledky zatíženy stejnou chybou. V tabulce 16 jsou uvedeny všechny přepočítané hodnoty halogenu a antimonu.

Tabulka 16: *Vypočtené procentuální zastoupení retardačních složek ve vzorcích*

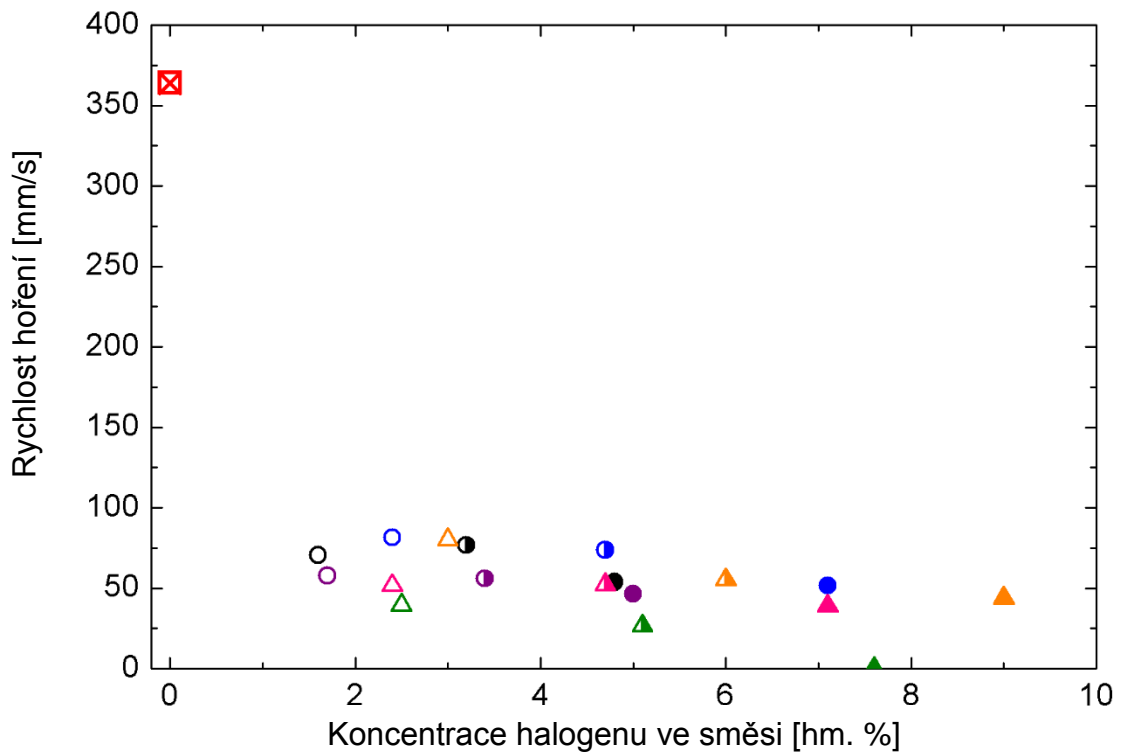
	Hmotnost granule [mg]	Zastoupení retardační složky v masterbachi [mg]	Poměr halogenu a antimonu [-]	Procentuální zastoupení halogenu [%]	Procentuální zastoupení antimonu [%]
Vzorek 1	11,105	6,8584	1,9	<b>39,3</b>	<b>20,3</b>
Vzorek 2	10,256	7,5843	1,5	<b>42,3</b>	<b>28,7</b>
Vzorek 3	10,067	5,0022	1,3	<b>26,5</b>	<b>21,0</b>
Vzorek 4	10,273	6,4165	2,2	<b>39,5</b>	<b>18,1</b>
Vzorek 5	10,223	4,0667	2,7	<b>28,0</b>	<b>10,2</b>
Vzorek 6	10,832	7,9464	2,5	<b>50,0</b>	<b>19,6</b>

V následujících grafech 11 – 19 jsou korigované hodnoty hoření v závislosti na obsahu halogenu, součtu obou látek zodpovědných za retardační účinek a vzájemném poměru halogenu a antimonu.



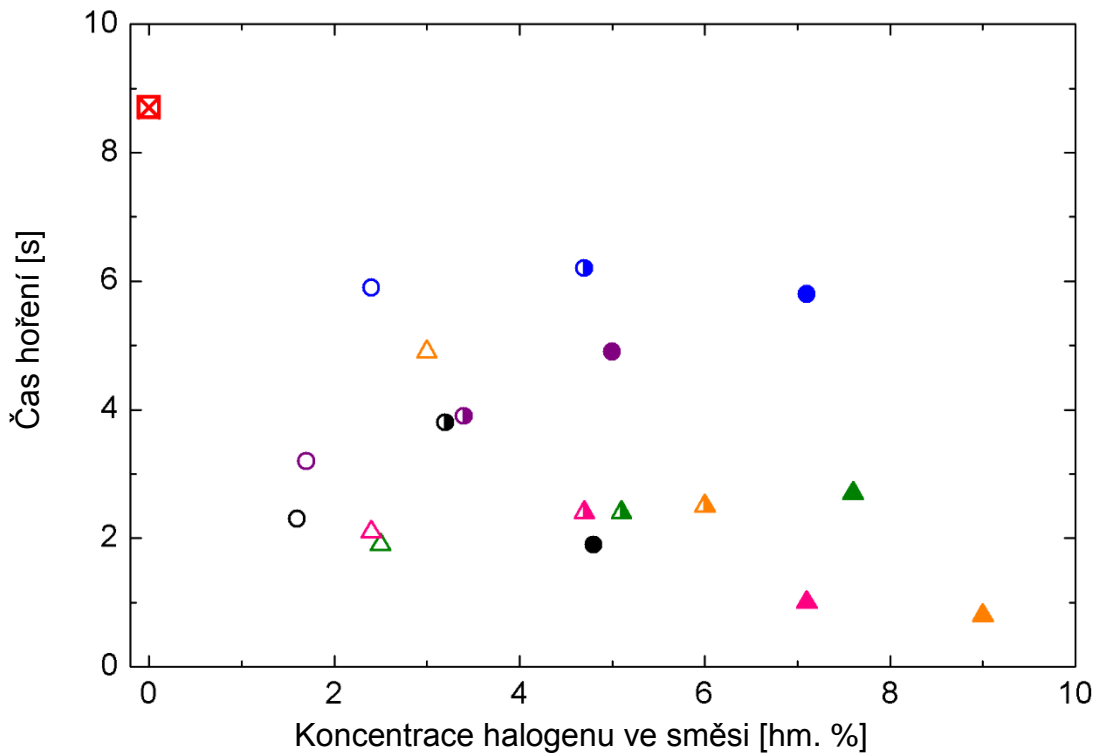
Graf 11: Závislost dosažení značky 150 mm na koncentraci halogenu

Kolečkem jsou označeny vzorky s obsahem chloru a trojúhelníkem vzorky s obsahem bromu. Různé koncentrace jsou od sebe označeny prázdným tvarem (6 hm. %), půleným tvarem (12 hm. %) a plným tvarem (18 hm. %). Barevné označení jednotlivých vzorků odpovídají barvám uvedeným v tabulce 8.



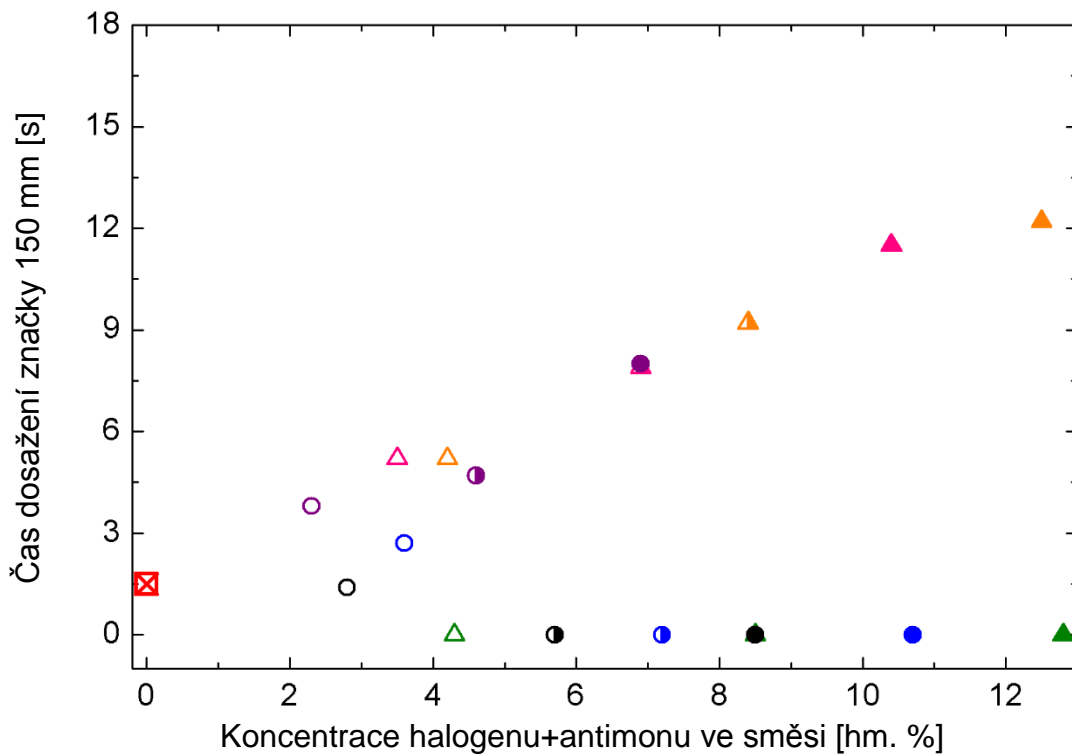
Graf 12: Závislost rychlosti hoření na koncentraci halogenu

Symbole v grafu 12 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



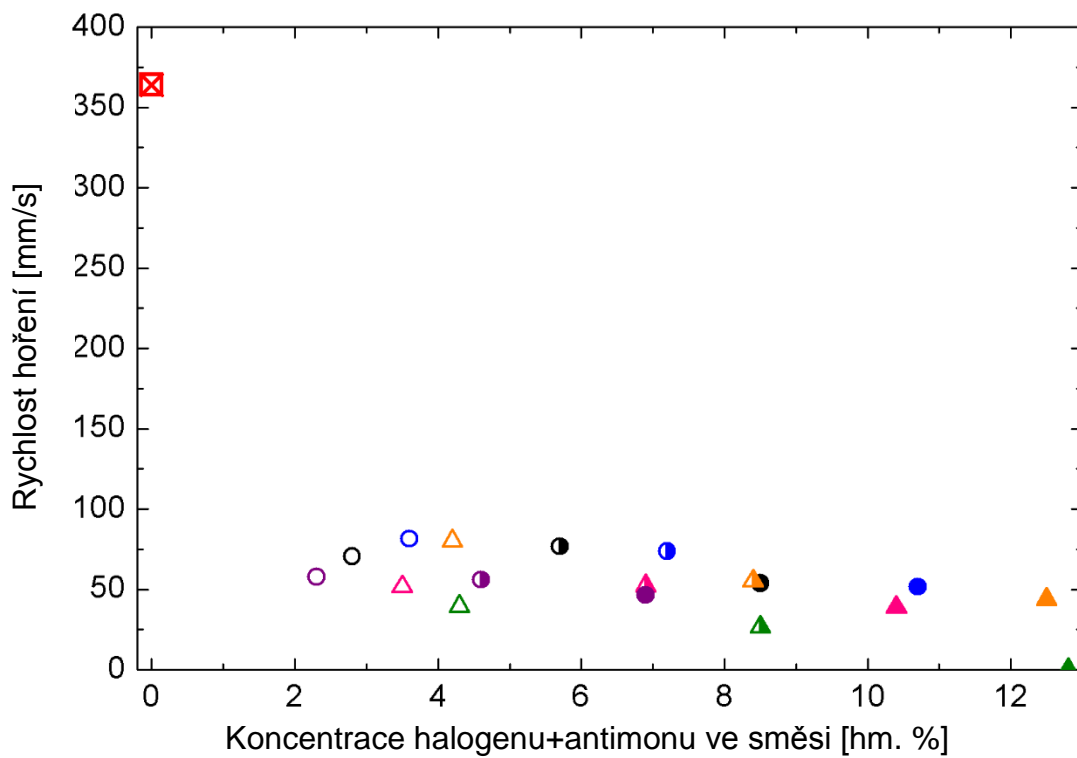
Graf 13: Závislost času hoření na koncentraci halogenu

Symbole v grafu 13 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



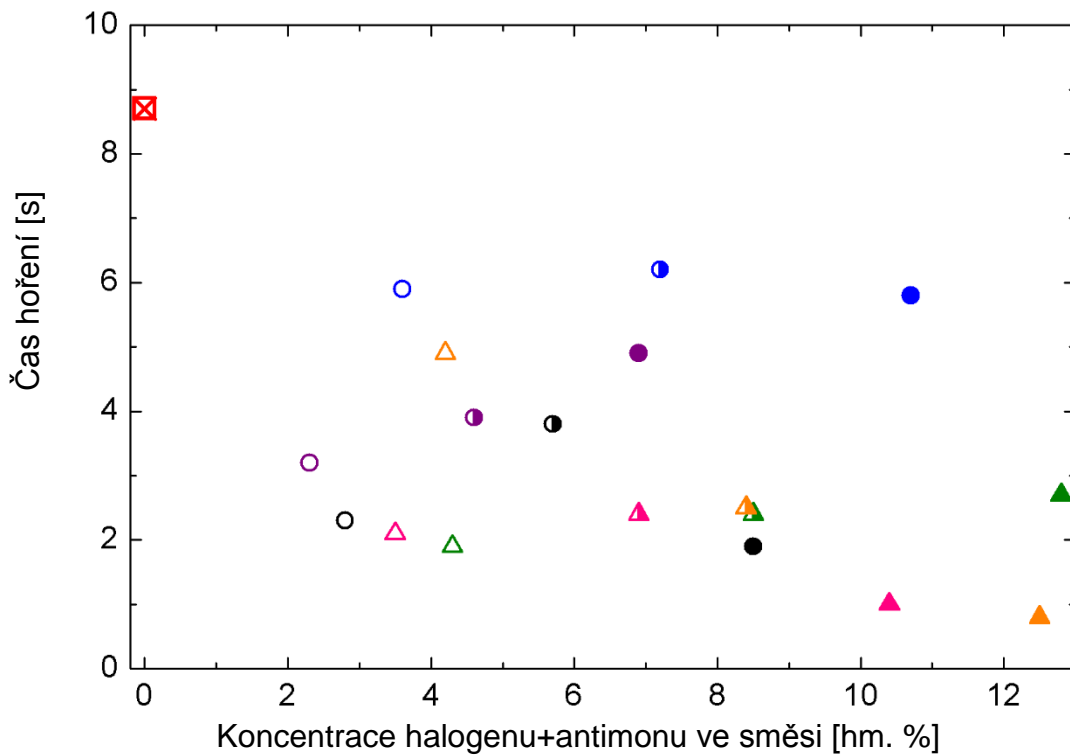
Graf 14: Závislost času dosažení značky 150 mm na součtu koncentrací halogen + antimon

Symbole v grafu 14 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



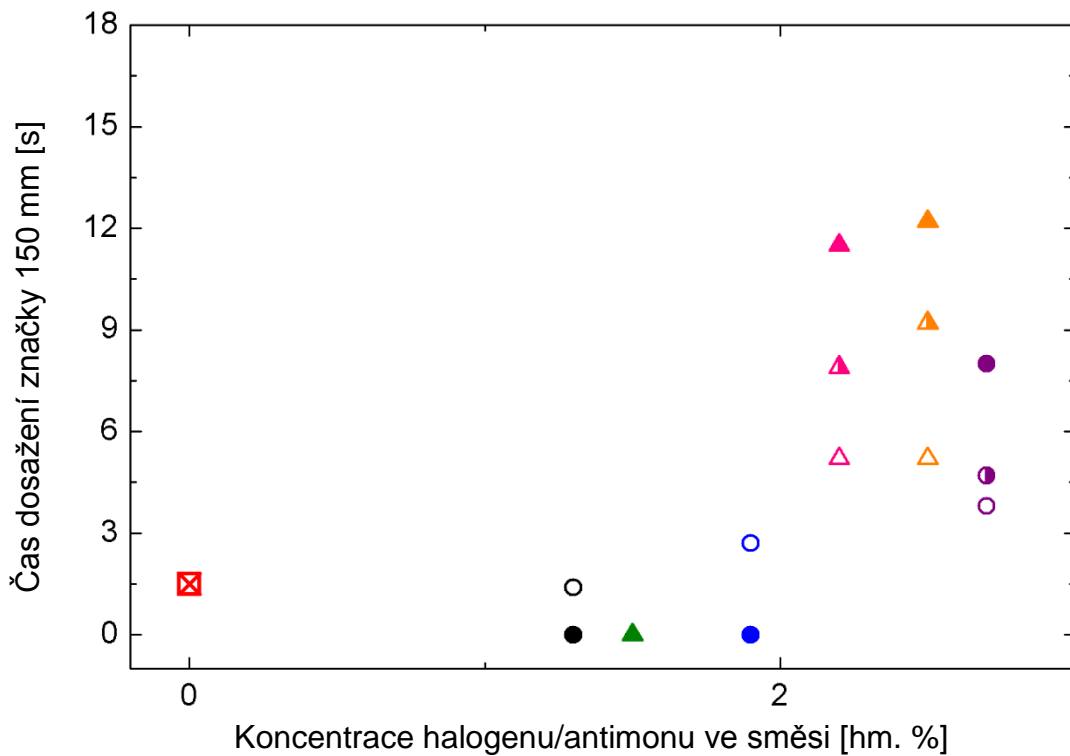
Graf 15: Závislost rychlosti hoření na součtu koncentrací halogen + antimon

Symbole v grafu 15 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



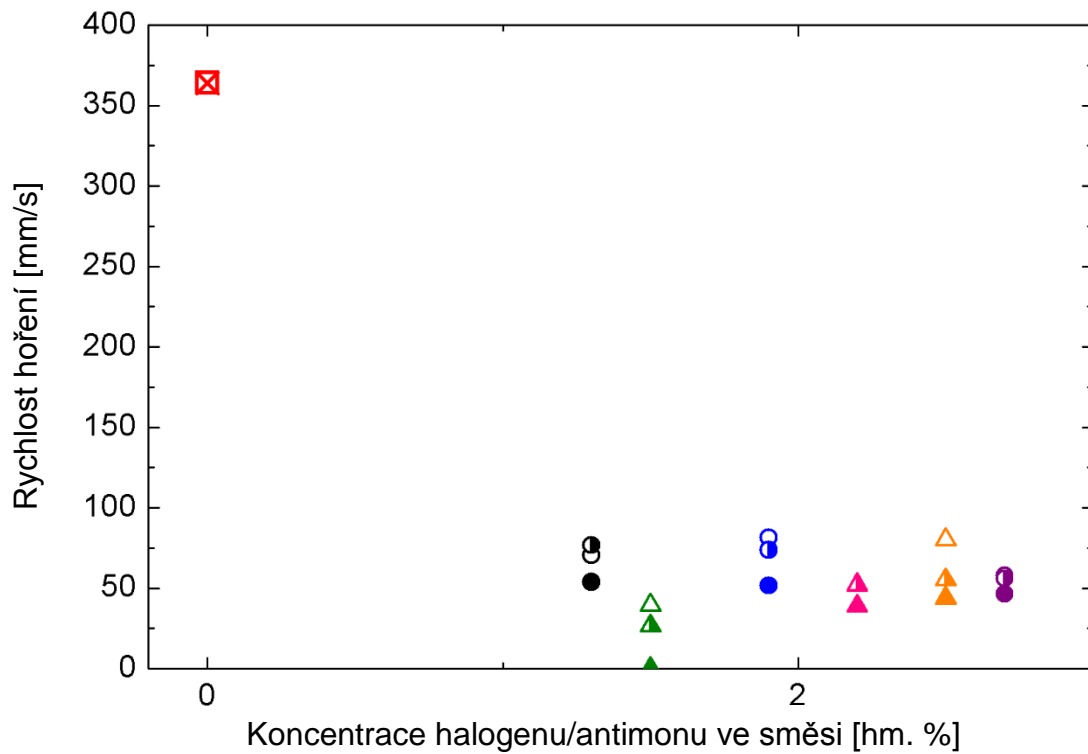
Graf 16: Závislost času hoření na koncentraci halogenu+antimon

Symbole v grafu 16 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



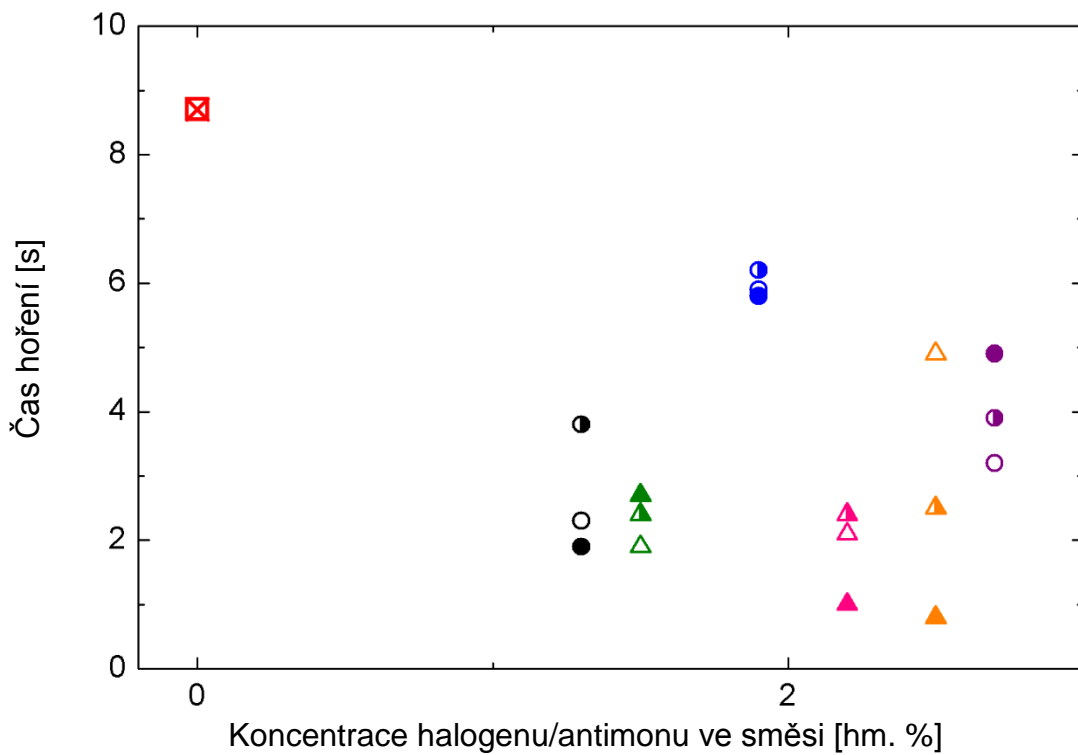
Graf 17: Závislost času dosažení značky 150 mm na poměru koncentrací halogen/antimon

Symbole v grafu 17 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



Graf 18: Závislost rychlosti hoření na poměru koncentrací halogen/antimon

Symbole v grafu 18 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



Graf 19: Závislost času hoření na poměru koncentrací halogen/antimon

Symbole v grafu 19 odpovídají symbolům uvedeným v grafu 11.



## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Při úpravě receptury směsi za účelem zvýšení odolnosti proti hoření je potřeba zohlednit několik aspektů. Směs upravená proti hoření musí mít nejen potřebné retardační výsledky, ale zároveň si musí ponechat svou původní zpracovatelnost a v ideálním případě se musí dát vyrobit za stejných procesních podmínek.

Je zřejmé, že některé koncentrace ze zvolených retardérů hoření tak lze již dopředu vyloučit, a to z důvodu vysoké nukleační schopnosti. Jako kritická koncentrace se ukázala u vzorků 2, 3, 4 a 6 hranice 18 hm. % masterbatchí, kde takové dávkování způsobilo kolaps pěny, právě v důsledku vysoké nukleační schopnosti. Zbylé vzorky 1 a 5 měly konstantní nukleaci u všech zkoušených koncentrací, ale jejich retardační schopnost se nevyrovnala ani některým vzorkům, u kterých stačilo dávkování pouze 6 hm. %. To může souviset s nižším obsahem aktivní látky v masterbatchi.

XRF analýzou bylo prokázáno, že vzorky retardérů 1, 3 a 5 jsou na bázi chloru a vzorky 2, 4 a 6 jsou na bázi bromu. Z tohoto měření byly také stanoveny podíly halogenu a synergické látky, kterou byl antimon. Zjištěné procentuální množství chloru v retardérech se pohybovalo v rozmezí od 54,1 hm. % do 70,4 hm. %, bromu od 58,9 hm. % do 66,2 hm. %. Obsah antimonu byl od 26,7 hm. % do 45,5 hm. %.

Na základě DSC analýzy pak byl určen polymerní typ nosiče retardérů. Vzhledem k průběhu DSC křivek a naměřených teplot tání (106 °C – 110 °C) lze říci, že u všech masterbatchí byl použit LDPE.

Přítomnost LDPE, stejně jako typ halogenu v jednotlivých masterbatchích byl následně potvrzen pomocí FTIR analýzy.

Z procesního hlediska bylo také důležité posoudit vliv přídavku masterbatche na kvalitu vytlačování pěny, a to jak z pohledu udržení předepsaných rozměrů, tak změny velikosti cel uvnitř pěny. Je zřejmé, že přídavek masterbatche vedl u vybraných vzorků (2, 3, 4, 6) ke zmenšení rozměrů a zároveň ke zmenšení velikosti cel. To může mít pozitivní vliv (snížení prostupu tepla), ale i negativní vliv (tenčí stěny jednotlivých cel) na hořlavost. Proto je těžké odhadovat, který faktor je rozhodující. Je však zřejmé, že velký vliv na tom budou mít složky ovlivňující nukleaci, tedy oxid antimonitý v první řadě.

Srovnáním výsledků zkoušek hořlavosti lze velmi obtížně určit, který typ retardéru je pro danou recepturu nejvhodnější.

Z hlediska retardace se jako nejlepší ukazoval vzorek 2, který obsahuje retardér na bázi bromu. Vysoké odolnosti dosahoval i při nejnižší koncentraci 6 hm. % a předčil i retardéry s výrazně vyšší koncentrací. Pouze při zkoušce hořlavosti podle normy UL94V vzorky 4C a 6C (18 hm. %) vykazovaly nižší hodnoty hořlavosti, jedná se však o koncentrace, které jsou v podstatě neprocesní.

Dalším hodnotícím kritériem bylo, zda vzorky produkují plamenně hořící kapky a zda zapálí suchý filtrační papír. U všech vzorků kromě vzorku 2, k zapálení filtračního papíru došlo. I z tohoto pohledu má vzorek 2 náskok oproti ostatním. Vzhledem k tomu, že zbylé vzorky na bázi bromu (4, 6), však již nedosahovaly takových výsledků, nelze jednoznačně vyhodnotit, který typ retardéru je lepší. Proto byla pozornost zaměřena na vliv koncentrace aktivní složky (obsah halogenu, součet halogenu a synergické látky a jejich vzájemný poměr). Ani to však nevedlo k jasnému závěru, je tedy zřejmé, že tedy retardace pěn je příliš komplexní proces, který není závislý pouze na druhu halogenu, jeho koncentraci či poměru se synergickou látkou, ale je funkcí mnoha proměnných. Těmito proměnnými je velikost cel, velikost částic synergické látky a možná i objemová hmotnost. Z tohoto důvodu se tedy nepodařilo jednoznačně určit, jestli jsou pro retardaci pěn lepší retardéry hoření na bázi bromu či chloru.

## ZÁVĚR

Cílem předkládané studie byla úprava stávající receptury pro výrobu LDPE pěn za účelem zlepšení její odolnosti proti hoření. Na základě literárních poznatků bylo vybráno šest vhodných, komerčně dostupných vzorků retardérů hoření na bázi halogenů vhodné pro LDPE a pěny.

Ty pak byly v dalším kroku analyzovány a rozděleny na retardéry na bázi chloru a bromu a byla stanovena množství aktivních látek v nich obsažených (množství halogenu a synergické látky) pomocí různých technik (DSC, TGA, XRF, FTIR).

Následně byly vzorky jednotlivých masterbatchů zamíchány do receptury v množství 6 až 18 hm. % a vytlačeny pěnové vzorky. Ty byly dále použity ke zkouškám hořlavosti. Na základě provedených zkoušek bylo zjištěno, že všechny zkoušené retardéry výrazně vylepšily odolnost LDPE pěn proti hoření, a to až o 90 % oproti výchozímu stavu.

Jako nejlepší ze zkoušených se ukázal vzorek 2, který obsahoval 58,9 % bromu a 40,6 % synergické látky, antimonu, tedy v přibližném poměru 3:2. Protože retardační schopnosti ostatních vzorků byly na podobné úrovni, nebylo možné jednoznačně určit, zda jsou retardéry na bázi bromu efektivnější, než ty na bázi chloru. Je však vysoce pravděpodobné, že mechanismus retardace bude ovlivněn více faktory, které však nebyly v rámci řešení dané problematiky zachyceny.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] THIELE W.C.: *Foam extrusion machinery features*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2000, 1. vydání, ISBN: 978-1-56676-879-5
- [2] THRONE J.L.: *Thermoplastic foams*. Sherwood Publishers, Hinckley 1996, 1. vydání, ISBN: 978-156990-360-5
- [3] PARK C.B.: *Continuous production of high-density and low-density microcellular plastics in extrusion*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2000, 1. vydání, ISBN: 978-1-56676-879-5
- [4] LANDOCK A.H.: *Handbook of plastic foams*. William Andrew Publishing 1995, ISBN: 978-0-8155-1357-5
- [5] GEDRON R.: *Thermoplastic foams – Processing*, CRC Press 2004, ISBN: 978-0-8493-1701-9
- [6] GOODMAN S.H.: *Handbook of thermoset plastics*. Noyes 1998, ISBN: 978-0-8155-1421-3
- [7] RUINAARD H.: *How to choose a polyolefin grade for physical foaming*. IN: *Blowing agents and foaming processes*, 2005, Stuttgart, SRN
- [8] PONTIFF T.: *Foaming agent for foam extrusion*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2000, 1. vydání, ISBN: 978-1-56676-879-5
- [9] PONTIFF T.: *Foaming agent for foam extrusion*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2014, 2. vydání, ISBN: 978-1-4398-9859-8
- [10] [http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glyceryl\\_monostearate#section=Top](http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glyceryl_monostearate#section=Top) [online], [cit. 2015-9-29]
- [11] LEE S.T.: *Foam nucleation in gas-dispersed polymeric systems*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2014, 2. vydání, ISBN: 978-1-4398-9859-8
- [12] GENDRON R.: *Rheology of thermoplastic foam extrusion process*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2014, 2. vydání, ISBN: 978-1-4398-9859-8

- [13] RAMESH N.S.: *Foam growth in polymers*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2014, 2. vydání, ISBN: 978-1-4398-9859-8
- [14] OHSHIMA M.: *Polymeric foaming simulation: Batch and continuous*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2014, 2. vydání, ISBN: 978-1-4398-9859-8
- [15] LEE S.T.: *Introduction*. IN: LEE S.T.: *Foam extrusion – Principles and practise*. CRC Press 2000, ISBN: 978-1-56676-879-5
- [16] THRONE J.L.: *Thermoplastic foam extrusion: In introduction*. Munich: Hanser Publishers, 2004, ISBN 1-569-90360-3
- [17] *Engineering honeycombs and foams* [online] [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/dmse/csg/Research.html>
- [18] MLEZIVA J.: *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání, Praha: Sobotáles, 2000, ISBN 80-859-2072-7
- [19] DUCHÁČEK V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vydání, Praha: VŠCHT, 2011, ISBN 978-80-7080-788-0
- [20] WILKIE C.A., MORGAN A.B.: *Fire retardancy of polymeric materials*. CRC Press, 2. vydání, 2009, ISBN 978-14-2008-399-6
- [21] ČSN ISO 8421-1 *Požární ochrana - Slovník - Část 1: Obecné termíny a jevy požárů*. Praha: Český normalizační institut, 1996
- [22] PRICE D., ANTHONY G., CARTY P.: *Fire retardant materials*. CRC Press, 2001, ISBN 0-8493-3883-2
- [23] PRICE D., HORROCKS R.A.: *Fire retardancy of polymeric materials*. CRC Press, 2010, ISBN 1420083996
- [24] POSNER S., ROOS S., OLSSON E.: *UNECE* [online]. 2010 [cit. 2015-12-14]. *Exploration of management options for HBCD*. Dostupné z [www: <http://www.unece.org/env/lrtap/TaskForce/popsxg/2010/Updated%20documentns\\_June2010/Exploration%20of%20management%20options%20for%20HBCD.pdf](http://www.unece.org/env/lrtap/TaskForce/popsxg/2010/Updated%20documentns_June2010/Exploration%20of%20management%20options%20for%20HBCD.pdf)
- [25] HULL R.T., STEC A.A.: *Fire retardancy of polymers: New strategies and mechanisms*. Cambridge: RCS Publishing, 2009, ISBN 978-0-85404-149-7

- [26] BOCCHINI S., CAMINO G.: *Fire retardanci of polymeric materials*. Boca Raton: CRC Press, 2. vydání, 2010, ISBN 1420083996
- [27] ASH M., ASH I.: *Handbook of plastics and rubber additives*. Synapse Information Resources, 2. vydání, 2004, ISBN: 978-1890595692
- [28] MASARÍK I.: *Plasty a jejich požární nebezpečí*. SPBI Ostrava, 2003, ISBN 80-86634-16-7
- [29] XRF [online].[cit. 2016-10-4]. Dostupné z www:  
[http://web.vscht.cz/~koplikr/6\\_FA\\_atomov%C3%A1\\_%20spektrometrie.pdf](http://web.vscht.cz/~koplikr/6_FA_atomov%C3%A1_%20spektrometrie.pdf)
- [30] Termické analýzy [online].[cit. 2016-11-4]. Dostupné z www:  
<http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [31] FTIR [online].[cit. 2016-12-4]. Dostupné z www:  
<http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm#V%C3%BDb%C4%9Br>
- [32] ČSN EN 13 501-1 Požární kvalifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb na oheň – Část 1: Kvalifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň
- [33] ČSN EN ISO 11 925-2 Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene
- [34] ČSN EN 13 823 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu.
- [35] UL94 [online].[cit. 2016-3-4]. Dostupné z www:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/horlavost.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/horlavost.pdf)
- [36] UL94 [online].[cit. 2016-3-4]. Dostupné z www:  
<http://www.ulffc.com/en/solutions/test-methods/combustion-fire/flammability-ul-94-hb.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

%	procento
°C	stupeň Celsia – jednotka teploty
a	rozměr zkušebního vzorku [mm]
b	rozměr zkušebního vzorku [mm]
Br	brom
CFC	freony (chlorofluorocarbon)
Cl	chlor
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
F	fluor
GMS	glycerol monostearát
HCl	chlorovodík
HDPE	vysokohustotní polyethylén (high density polyethylene)
HX	halogenovodík
I	jód
kPa	kilopascal – jednotka tlaku
L	poškozená délka [mm]
LDPE	nízkohustotní polyethylén (low density polyethylene)
LLDPE	lineární nízkohustotní polyethylén (linear low density polyethylene)
m	hmotnost [kg]
MPa	megapascal – jednotka tlaku
N <sub>2</sub>	dusík
O·	kyslíkový radikál
O <sub>2</sub>	kyslík
OH·	hydroxylový radikál

---

P	fosfor
PE	polyethylén
PR1	tlakové čidlo
PR2	tlakové čidlo
PRF	tlakové čidlo
PVC	polyvinylchlorid
Sb	antimon
Si	křemík
t	čas hoření [s]
TC1	teplotní čidlo
TC2	teplotní čidlo
v	rychlost hoření [mm/min]
X	halogen
$\rho$	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Schéma souběžných šneků (vlevo) a protiběžné (vpravo) .....	12
Obr. 2: Homogenizace polymerní směsi s nadouvadlem .....	13
Obr. 3: Závislost viskozity taveniny na poloze ve šneku .....	14
Obr. 4: Strukturní vzorec molekuly GMS.....	18
Obr. 5: Vliv tlaku na pozici pění .....	21
Obr. 6: Vliv teploty na proces pění .....	22
Obr. 7: Procesní okno u amorfních, semikrystalických a krystalických polymerů .....	23
Obr. 8: Otevřená struktura polyuretanu a uzavřená struktura polyethylenu .....	24
Obr. 9: Struktura makromolekul různých typů polyethylenů .....	26
Obr. 10: Schéma trubkového reaktoru .....	27
Obr. 11: Schéma cyklu hoření polymerů.....	30
Obr. 12: Schéma vytlačovacího stroje a rozmístění teplotních a tlakových čidel.....	40
Obr. 13: Zkušební těleso .....	41
Obr. 14: Velikost cel srovnávacího vzorku 0 .....	51
Obr. 15: Velikost cel vzorku 1A (vlevo), 1B (uprostřed), 1C (vpravo) .....	51
Obr. 16: Velikost cel vzorku 2A (vlevo), 2B (uprostřed), 2C (vpravo) .....	52
Obr. 17: Velikost cel vzorku 3A (vlevo), 3B (uprostřed), 3C (vpravo) .....	52
Obr. 18: Velikost cel vzorku 4A (vlevo), 4B (uprostřed), 4C (vpravo) .....	52
Obr. 19: Velikost cel vzorku 5A (vlevo), 5B (uprostřed), 5C (vpravo) .....	52
Obr. 20: Velikost cel vzorku 6A (vlevo), 6B (uprostřed), 6C (vpravo) .....	53
Obr. 21: Rozměr srovnávacího vzorku.....	53
Obr. 22: Změna rozměrů vzorku 1A (vlevo), 1B (uprostřed) a 1C (vpravo) .....	53
Obr. 23: Změna rozměrů vzorku 2A (vlevo), 2B (uprostřed) a 2C (vpravo).....	54
Obr. 24: Změna rozměrů vzorku 3A (vlevo), 3B (uprostřed) a 3C (vpravo).....	54
Obr. 25: Změna rozměrů vzorku 4A (vlevo), 4B (uprostřed) a 4C (vpravo).....	54
Obr. 26: Změna rozměrů vzorku 5A (vlevo), 5B (uprostřed) a 5C (vpravo).....	54
Obr. 27: Změna rozměrů vzorku 6A (vlevo), 6B (uprostřed) a 6C (vpravo).....	54
Obr. 28: Ukázka měření podle normy 11 925-2.....	58
Obr. 29: Ukázka měření podle normy UL94HB .....	61
Obr. 30: Ukázka měření podle normy UL94V .....	64

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: <i>Souhrn fyzikálních nadouvadel</i> .....	17
Tabulka 2: <i>Souhrn chemických nadouvadel</i> .....	20
Tabulka 3: <i>Přehled nejběžnějších polyolefinů a jejich vlastností</i> .....	25
Tabulka 4: <i>Rozdělení polyethylenů podle hustoty</i> .....	26
Tabulka 5: <i>Rozdíly v technologických podmínkách</i> .....	28
Tabulka 6: <i>Nastavené teploty na jednotlivých zónách</i> .....	41
Tabulka 7: <i>Změny procesních parametrů pro všechny typy a koncentrace retardérů</i> ...	42
Tabulka 8: <i>Barevné označení vzorků</i> .....	43
Tabulka 9: <i>XRF analýza vzorků retardérů</i> .....	44
Tabulka 10: <i>Teploty tání a krystalizace všech vzorků</i> .....	47
Tabulka 11: <i>TGA analýza všech vzorků retardérů hoření</i> .....	48
Tabulka 12: <i>Změna průřezu vzorků proti srovnávacímu vzorku</i> .....	55
Tabulka 13: <i>Přehled skutečných a korigovaných hodnot závislosti času dosažení značky 150 mm</i> .....	60
Tabulka 14: <i>Přehled skutečných a korigovaných hodnot rychlosti hoření</i> .....	63
Tabulka 15: <i>Přehled skutečných a korigovaných hodnot času hoření</i> .....	66
Tabulka 16: <i>Vypočtené procentuální zastoupení retardačních složek ve vzorcích</i> .....	67

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1: Závislost tlaku PR2 na typu a koncentraci retardéru.....	43
Graf 2: DCS křivky jednotlivých vzorků masterbatchů, červeně vyznačená je křivka tání, modře vyznačené je křivka krystalizace .....	46
Graf 3: TGA křivky jednotlivých vzorků masterbatchí.....	49
Graf 4: Závislost objemové hmotnosti na typu a koncentraci retardéru .....	56
Graf 5: Závislost času dosažení značky 150 mm na typu a koncentraci retardéru .....	59
Graf 6: Závislost času dosažení značky 150 mm na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty.....	59
Graf 7: Závislost rychlosti hoření na typu a koncentraci retardéru .....	62
Graf 8: Závislost rychlosti hoření na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty .....	62
Graf 9: Závislost času hoření na typu a koncentraci retardéru.....	65
Graf 10: Závislost času hoření na typu a koncentraci retardéru – korigované hodnoty	65
Graf 11: Závislost dosažení značky 150 mm na koncentraci halogenu .....	68
Graf 12: Závislost rychlosti hoření na koncentraci halogenu .....	69
Graf 13: Závislost času hoření na koncentraci halogenu .....	69
Graf 14: Závislost času dosažení značky 150 mm na součtu koncentrací halogen + antimon .....	70
Graf 15: Závislost rychlosti hoření na součtu koncentrací halogen + antimon .....	70
Graf 16: Závislost času hoření na koncentraci halogenu+antimon .....	71
Graf 17: Závislost času dosažení značky 150 mm na poměru koncentrací halogen/antimon .....	71
Graf 18: Závislost rychlosti hoření na poměru koncentrací halogen/antimon.....	72
Graf 19: Závislost času hoření na poměru koncentrací halogen/antimon.....	72

## **SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY ROZMĚRŮ

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY 11 925-2

PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY UL94HB

PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY UL94V

**PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY ROZMĚRŮ**Tabulka PI-1: *Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 0*

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
	Vzorek	a	b	c		
	0	22,51	28,41	57,41	0,842	22,93
	0	22,47	28,39	62,56	0,906	22,70
	0	22,5	28,45	62,54	0,909	22,71
	0	22,57	28,48	57,35	0,841	22,81
	0	22,45	28,41	47,32	0,687	22,76
	<b>Průměr</b>	<b>22,50</b>	<b>28,43</b>			<b>22,78</b>
	<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,05</b>	<b>0,04</b>			<b>0,10</b>

Tabulka PI-2: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 1

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
1A		22,83	28,18	69,42	1,129	25,28
1A		22,92	28,06	52,27	0,853	25,37
1A		22,86	28,12	65,32	1,069	25,46
1A		22,79	28,09	58,41	0,947	25,33
1A		22,89	28,11	49,32	0,801	25,24
Průměr		<b>22,86</b>	<b>28,11</b>			<b>25,34</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,05</b>	<b>0,04</b>			<b>0,09</b>
1B		22,81	27,79	53,35	0,889	26,29
1B		22,53	27,71	56,53	0,937	26,55
1B		22,65	27,75	65,24	1,087	26,51
1B		22,74	27,69	57,12	0,956	26,58
1B		22,8	27,71	48,24	0,805	26,41
Průměr		<b>22,71</b>	<b>27,73</b>			<b>26,47</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,12</b>	<b>0,04</b>			<b>0,12</b>
1C		22,24	27,19	69,32	1,116	26,62
1C		22,23	27,07	60,32	0,962	26,50
1C		22,29	27,11	65,24	1,048	26,58
1C		22,18	27,15	57,45	0,917	26,51
1C		22,24	27,09	68,12	1,095	26,68
Průměr		<b>22,24</b>	<b>27,12</b>			<b>26,58</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,04</b>	<b>0,05</b>			<b>0,08</b>

Tabulka PI-3: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 2

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
	2A	21,25	26,27	66,85	0,967	25,91
	2A	21,36	25,91	56,93	0,829	26,31
	2A	21,31	26,14	50,74	0,742	26,25
	2A	21,29	25,98	65,27	0,947	26,23
	2A	21,32	26,09	48,35	0,705	26,21
Průměr		<b>21,31</b>	<b>26,08</b>			<b>26,18</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,04</b>	<b>0,14</b>			<b>0,16</b>
	2B	20,72	24,72	57,03	0,773	26,46
	2B	20,85	24,48	55,41	0,757	26,77
	2B	20,8	24,64	60,47	0,824	26,59
	2B	20,75	24,71	48,32	0,662	26,72
	2B	20,81	24,59	55,98	0,762	26,60
Průměr		<b>20,79</b>	<b>24,63</b>			<b>26,63</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,05</b>	<b>0,10</b>			<b>0,12</b>
	2C	20,32	24,2	46,64	0,624	27,21
	2C	20,29	24,29	50,07	0,667	27,03
	2C	20,35	24,25	60,41	0,812	27,24
	2C	20,28	24,24	55,24	0,739	27,21
	2C	20,31	24,28	48,68	0,657	27,37
Průměr		<b>20,31</b>	<b>24,25</b>			<b>27,21</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,03</b>	<b>0,04</b>			<b>0,12</b>

Tabulka PI-4: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 3

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
3A		21,45	26,27	54,77	0,817	26,47
3A		21,56	26,39	45,03	0,675	26,35
3A		21,52	26,22	56,41	0,838	26,33
3A		21,48	26,32	60,74	0,925	26,94
3A		21,51	26,29	40,21	0,602	26,47
Průměr		<b>21,50</b>	<b>26,30</b>			<b>26,5</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,04</b>	<b>0,06</b>			<b>0,2</b>
3B		21,67	26,35	64,99	0,994	26,79
3B		21,58	26,22	72,66	1,098	26,71
3B		21,59	26,34	58,32	0,884	26,65
3B		21,68	26,28	45,38	0,698	27,00
3B		21,62	26,31	61,47	0,935	26,74
Průměr		<b>21,63</b>	<b>26,30</b>			<b>26,78</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,05</b>	<b>0,05</b>			<b>0,13</b>
3C		19,89	25,35	46,29	0,735	31,49
3C		19,91	25,42	45,36	0,722	31,45
3C		20,12	25,41	49,94	0,792	31,02
3C		20,04	25,38	55,69	0,885	31,24
3C		19,99	25,39	60,47	0,958	31,21
Průměr		<b>19,99</b>	<b>25,39</b>			<b>31,28</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,09</b>	<b>0,03</b>			<b>0,19</b>



Tabulka PI-5: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 4

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
4A		21,68	26,08	59,51	0,895	26,60
4A		21,68	26,29	72,38	1,089	26,40
4A		21,63	26,14	65,12	0,974	26,45
4A		21,58	26,15	58,47	0,876	26,55
4A		21,65	26,24	45,96	0,687	26,31
Průměr		<b>21,64</b>	<b>26,18</b>			<b>26,46</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,04</b>	<b>0,08</b>			<b>0,12</b>
4B		20,61	24,76	54,59	0,758	27,21
4B		20,66	24,65	46,54	0,644	27,17
4B		20,54	24,76	54,49	0,755	27,24
4B		20,62	24,68	60,21	0,836	27,28
4B		20,58	24,72	75,25	1,052	27,48
Průměr		<b>20,60</b>	<b>24,71</b>			<b>27,28</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,04</b>	<b>0,05</b>			<b>0,12</b>
4C		19,53	23,47	79,85	1,007	27,51
4C		19,68	23,45	57,21	0,728	27,57
4C		19,62	23,42	62,14	0,787	27,56
4C		19,57	23,51	49,85	0,631	27,51
4C		19,65	23,46	71,01	0,902	27,55
Průměr		<b>19,61</b>	<b>23,46</b>			<b>27,54</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,06</b>	<b>0,03</b>			<b>0,03</b>

Tabulka PI-6: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 5

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
5A		22,15	27,2	52,19	0,775	24,65
5A		22,06	27,19	56,63	0,831	24,46
5A		22,09	27,11	60,24	0,887	24,59
5A		22,11	27,22	71,58	1,054	24,47
5A		22,08	27,18	45,32	0,664	24,41
Průměr		<b>22,10</b>	<b>27,18</b>			<b>24,52</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,03</b>	<b>0,04</b>			<b>0,10</b>
5B		22,39	27,87	63,24	0,997	25,26
5B		22,37	27,92	61,71	0,971	25,19
5B		22,42	27,91	45,21	0,714	25,24
5B		22,36	27,86	74,24	1,168	25,26
5B		22,41	27,93	63,74	1,004	25,17
Průměr		<b>22,39</b>	<b>27,90</b>			<b>25,22</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,03</b>	<b>0,03</b>			<b>0,04</b>
5C		22,4	27,88	69,58	1,115	25,66
5C		22,33	27,82	70,84	1,119	25,43
5C		22,38	27,85	50,27	0,801	25,56
5C		22,36	27,88	55,65	0,885	25,51
5C		22,41	27,79	47,82	0,762	25,59
Průměr		<b>22,38</b>	<b>27,84</b>			<b>25,55</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,03</b>	<b>0,04</b>			<b>0,09</b>

Tabulka PI-7: Naměřené hodnoty rozměrů pro vzorek 6

		Rozměr [mm]			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Vzorek		a	b	c		
	6A	21,43	25,92	54,99	0,788	25,80
	6A	21,48	25,97	58,47	0,847	25,97
	6A	21,37	25,96	45,21	0,651	25,96
	6A	21,45	25,89	62,32	0,895	25,86
	6A	21,32	25,94	41,02	0,584	25,74
Průměr		<b>21,41</b>	<b>25,94</b>			<b>25,87</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,06</b>	<b>0,03</b>			<b>0,10</b>
	6B	20,73	24,09	66,65	0,869	26,11
	6B	20,69	24,15	52,65	0,686	26,08
	6B	20,75	24,12	61,32	0,807	26,30
	6B	20,72	24,15	48,97	0,641	26,16
	6B	20,72	24,1	53,14	0,697	26,27
Průměr		<b>20,72</b>	<b>24,12</b>			<b>26,18</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,02</b>	<b>0,03</b>			<b>0,10</b>
	6C	18,24	23,16	56,3	0,676	28,42
	6C	18,19	23,14	45,32	0,541	28,36
	6C	18,22	23,10	62,47	0,749	28,49
	6C	18,21	23,15	58,25	0,693	28,22
	6C	18,25	23,16	62,14	0,743	28,29
Průměr		<b>18,22</b>	<b>23,14</b>			<b>28,36</b>
Směrodatná odchylka		<b>0,02</b>	<b>0,02</b>			<b>0,11</b>

**PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY 19 925-2**Tabulka PII-1: *Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 0*

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	0	Ano	Ano	1,5	Ano	Ano
	0	Ano	Ano	1,1	Ano	Ano
	0	Ano	Ano	1,4	Ano	Ano
	0	Ano	Ano	1,1	Ano	Ano
	0	Ano	Ano	2,3	Ano	Ano
Průměr				<b>1,5</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,5</b>		

Tabulka PII-2: Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 1

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	1A	Ano	Ano	2,5	Ano	Ano
	1A	Ano	Ano	3,4	Ano	Ano
	1A	Ano	Ano	1,9	Ano	Ano
	1A	Ano	Ano	2,4	Ano	Ano
	1A	Ano	Ano	3,1	Ano	Ano
Průměr				<b>2,7</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,6</b>		
	1B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1B	Ano	Ano	4,5	Ano	Ano
	1B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		
	1C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	1C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		

Tabulka PII-3: Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 2

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	2A	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2A	Ano	Ano	1,3	Ano	Ano
	2A	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2A	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2A	Ano	Ne	-	Ano	Ne
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		
	2B	Ano	Ano	3,5	Ano	Ne
	2B	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2B	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2B	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2B	Ano	Ne	-	Ano	Ne
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		
	2C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	2C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		

Tabulka PII-4: Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 3

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	3A	Ano	Ano	1,4	Ano	Ano
	3A	Ano	Ano	1,8	Ano	Ano
	3A	Ano	Ano	1,9	Ano	Ano
	3A	Ano	Ano	1,2	Ano	Ano
	3A	Ano	Ano	1,4	Ano	Ano
Průměr				<b>1,6</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,3</b>		
	3B	Ano	Ano	3,2	Ano	Ano
	3B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3B	Ano	Ne	-	Ano	Ano
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		
	3C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	3C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
Průměr				-		
Směrodatná odchylka				-		

Tabulka PII-5: Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 4

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	4A	Ano	Ano	5,3	Ano	Ano
	4A	Ano	Ano	7,3	Ano	Ano
	4A	Ano	Ano	6,4	Ano	Ano
	4A	Ano	Ano	4,2	Ano	Ano
	4A	Ano	Ano	5,8	Ano	Ano
Průměr				<b>5,9</b>		
Směrodatná odchylka				<b>1,1</b>		
	4B	Ano	Ano	9,3	Ano	Ano
	4B	Ano	Ano	10,3	Ano	Ano
	4B	Ano	Ano	9,6	Ano	Ano
	4B	Ano	Ano	9,5	Ano	Ano
	4B	Ano	Ano	10,2	Ano	Ano
Průměr				<b>9,9</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,5</b>		
	4C	Ano	Ano	15,2	Ano	Ano
	4C	Ano	Ne	-	Ano	Ne
	4C	Ano	Ano	17,6	Ano	Ano
	4C	Ano	Ano	14,8	Ano	Ano
	4C	Ano	NE	16,4	Ano	Ano
Průměr				<b>16,0</b>		
Směrodatná odchylka				<b>1,3</b>		



Tabulka PII-6: Naměřené hodnoty dle normy 11 925 pro vzorek 5

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	5A	Ano	Ano	3,8	Ano	Ano
	5A	Ano	Ano	6,3	Ano	Ano
	5A	Ano	Ano	2,9	Ano	Ano
	5A	Ano	Ano	3,1	Ano	Ano
	5A	Ano	Ano	4,1	Ano	Ano
Průměr				<b>4,1</b>		
Směrodatná odchylka				<b>1,4</b>		
	5B	Ano	Ano	2,7	Ano	Ano
	5B	Ano	Ano	5,8	Ano	Ano
	5B	Ano	Ano	4,2	Ano	Ano
	5B	Ano	Ano	5,3	Ano	Ano
	5B	Ano	Ano	6,1	Ano	Ano
Průměr				<b>4,8</b>		
Směrodatná odchylka				<b>1,4</b>		
	5C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	5C	Ano	Ano	7,4	Ano	Ano
	5C	Ano	Ne	-	Ano	Ano
	5C	Ano	Ano	8,9	Ano	Ano
	5C	Ano	Ne	-	Ne	Ne
Průměr				<b>8,2</b>		
Směrodatná odchylka				<b>1,0</b>		

Tabulka PII-7: Naměřené hodnoty dle normy 19 925 pro vzorek 6

	Vzorek	Zapálení	Dosáhne značky 150 mm	Čas dosažení značky 150 mm [s]	Okapává	Zapálení papíru
	6A	Ano	Ano	5,6	Ano	Ano
	6A	Ano	Ano	5,9	Ano	Ano
	6A	Ano	Ano	4,9	Ano	Ano
	6A	Ano	Ano	5,4	Ano	Ano
	6A	Ano	Ano	5,6	Ano	Ano
Průměr				<b>5,5</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,3</b>		
	6B	Ano	Ano	9,42	Ano	Ano
	6B	Ano	Ano	9,56	Ano	Ano
	6B	Ano	Ano	9,38	Ano	Ano
	6B	Ano	Ano	9,52	Ano	Ano
	6B	Ano	Ano	9,22	Ano	Ano
Průměr				<b>9,42</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,13</b>		
	6C	Ano	Ano	12,6	Ano	Ano
	6C	Ano	Ano	12,1	Ano	Ano
	6C	Ano	Ano	12,5	Ano	Ano
	6C	Ano	Ano	12,3	Ano	Ano
	6C	Ano	Ano	12,7	Ano	Ano
Průměr				<b>12,5</b>		
Směrodatná odchylka				<b>0,2</b>		

**PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY UL94HB**Tabulka PIII-1: *Naměřené hodnoty dle normy UL94HB pro vzorek 0*

Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
0	1,2	12,3	75	365	Ano
0	2,1	13,6	75	330	Ano
0	1,9	11,6	75	376	Ano
0	2,4	12,8	75	351	Ano
0	1,4	11,3	75	398	Ano
Průměr	<b>1,9</b>	<b>12,4</b>		<b>364</b>	
Směrodatná odchylka	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>		<b>26</b>	

Tabulka PIII-2: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 1

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	1A	5,8	34,3	45	79	Ano
	1A	7,8	22,1	29	79	Ano
	1A	7,1	25,1	40	96	Ano
	1A	6,9	28,9	35	73	Ano
	1A	7,5	27,6	37	80	Ano
Průměr		<b>7,0</b>	<b>28</b>		<b>81</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,8</b>	<b>5</b>		<b>9</b>	
	1B	5,0	14,2	20	84	Ano
	1B	7,6	12,6	17	81	Ano
	1B	7,7	13,5	14	62	Ano
	1B	6,9	15,2	16	63	Ano
	1B	6,7	14,2	20	84	Ano
Průměr		<b>6,8</b>	<b>13,9</b>		<b>75</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,1</b>	<b>0,96</b>		<b>11</b>	
	1C	8,7	12,6	10	47	Ne
	1C	6,8	10,9	9	49	Ne
	1C	5,7	11,3	12	63	Ne
	1C	6,5	13,7	15	65	Ne
	1C	7,3	12,3	10	49	Ne
Průměr		<b>7,0</b>	<b>12,2</b>		<b>55</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,1</b>	<b>1,1</b>		<b>9</b>	

Tabulka PIII-3: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 2

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	2A	21	4,2	4	56	Ne
	2A	26	3,5	3	51	Ano
	2A	22	2,8	3	63	Ano
	2A	24	3,4	1	17	Ano
	2A	26	2,9	2	40	Ne
Průměr		<b>24</b>	<b>3,4</b>		<b>46</b>	
Směrodatná odchylka		<b>2</b>	<b>0,6</b>		<b>18</b>	
	2B	28,3	6,5	3	27	Ne
	2B	26,6	5,7	5	52	Ano
	2B	29,9	-	0	-	Ne
	2B	29,8	7,1	4	34	Ne
	2B	28,6	6,2	2	19	Ano
Průměr		<b>28,7</b>	<b>6,4</b>		<b>33</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,3</b>	<b>0,5</b>		<b>14</b>	
	2C	29,3	-	0	-	Ne
	2C	28,6	-	0	-	Ne
	2C	27,2	-	0	-	Ne
	2C	28,9	-	0	-	Ne
	2C	30,0	-	0	-	Ne
Průměr		<b>28,8</b>	<b>-</b>		<b>-</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,1</b>	<b>-</b>		<b>-</b>	

Tabulka PIII-4: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 3

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	3A	10,9	23,1	30	76	Ano
	3A	13,2	22,5	31	83	Ano
	3A	13,1	23,5	35	88	Ano
	3A	12,5	26,4	33	76	Ano
	3A	12,3	24,2	31	76	Ano
Průměr		<b>12,5</b>	<b>24,1</b>		<b>80</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,4</b>	<b>1,3</b>		<b>5</b>	
	3B	14,8	15,3	20	78	Ano
	3B	17,3	13,6	23	101	Ano
	3B	16,4	14,2	19	80	Ano
	3B	15,9	15,8	21	82	Ano
	3B	16,3	14,6	22	90	Ano
Průměr		<b>16,2</b>	<b>14,6</b>		<b>86</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,9</b>	<b>0,7</b>		<b>10</b>	
	3C	20,6	-	0	-	Ano
	3C	19,3	1,4	2	81	Ano
	3C	21,3	2,2	2	55	Ano
	3C	22,6	-	0	-	Ano
	3C	23,2	-	0	-	Ano
Průměr		<b>21,4</b>	<b>1,8</b>		<b>68</b>	
Směrodatná odchylka		<b>1,5</b>	<b>0,5</b>		<b>19</b>	

Tabulka PIII-5: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 4

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	4A	6,5	61,2	63	62	Ano
	4A	6,5	59,2	55	56	Ano
	4A	5,4	58,6	57	58	Ano
	4A	6,8	62,9	58	55	Ano
	4A	7,5	60,1	60	60	Ano
Průměr		<b>6,4</b>	<b>60,4</b>		<b>58</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,6</b>	<b>1,7</b>		<b>3</b>	
	4B	8,3	52,2	56	64	Ano
	4B	8,6	48,6	57	70	Ano
	4B	7,9	56,6	58	61	Ano
	4B	8,6	54,2	55	61	Ano
	4B	6,9	49,9	59	71	Ano
Průměr		<b>8,1</b>	<b>52</b>		<b>66</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,7</b>	<b>3</b>		<b>5</b>	
	4C	9,1	45,9	40	52	Ano
	4C	10,1	38,6	35	54	Ne
	4C	8,1	46,6	41	53	Ano
	4C	9,6	39,2	37	57	Ano
	4C	8,7	42,1	38	54	Ano
Průměr		<b>9,1</b>	<b>43</b>		<b>54</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,8</b>	<b>4</b>		<b>2</b>	

Tabulka PIII-6: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 5

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	5A	3,2	41	45	65	Ano
	5A	4,5	39	40	61	Ano
	5A	3,6	38	43	67	Ano
	5A	4,4	45	40	53	Ano
	5A	5,1	40	42	62	Ano
Průměr		<b>4,1</b>	<b>41</b>		<b>62</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,8</b>	<b>3</b>		<b>5</b>	
	5B	4,0	32,	30	55	Ano
	5B	5,1	23	27	69	Ano
	5B	4,5	30	29	56	Ano
	5B	6,0	35	31	52	Ano
	5B	5,9	28	26	55	Ano
Průměr		<b>5,1</b>	<b>30</b>		<b>57</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,9</b>	<b>5</b>		<b>7</b>	
	5C	9,5	8,5	10	70	Ano
	5C	7,4	7,5	5	40	Ano
	5C	8,2	9,2	9	58	Ano
	5C	8,7	8,6	4	28	Ano
	5C	9,6	9,8	7	43	Ano
Průměr		<b>8,7</b>	<b>8,8</b>		<b>48</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,9</b>	<b>0,8</b>		<b>17</b>	



Tabulka PIII-7: Naměřené hodnoty dle normy UL9HB pro vzorek 6

	Vzorek	Čas hoření po dosažení první značky [s]	Čas hoření od první značky [s]	Poškozená délka [mm]	Rychlost hoření [mm/min]	Okapává
	6A	5,4	17,01	27	95	Ano
	6A	5,7	17,32	26	90	Ano
	6A	5,9	16,95	29	103	Ano
	6A	5,5	17,15	24	84	Ano
	6A	5,7	16,76	25	89	Ano
Průměr		<b>5,7</b>	<b>17,0</b>		<b>92</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,2</b>	<b>0,2</b>		<b>7</b>	
	6B	6,73	16,3	22	81	Ano
	6B	6,52	17,0	17	60	Ano
	6B	6,66	16,2	20	74	Ano
	6B	6,35	16,4	20	73	Ano
	6B	6,42	16,3	18	66	Ano
Průměr		<b>6,54</b>	<b>16,5</b>		<b>71</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,16</b>	<b>0,3</b>		<b>8</b>	
	6C	7,8	14,2	17	72	Ano
	6C	7,8	14,2	18	72	Ano
	6C	7,5	14,6	14	57	Ano
	6C	7,9	14,7	16	65	Ano
	6C	7,6	14,4	16	67	Ano
Průměr		<b>7,8</b>	<b>14,6</b>		<b>67</b>	
Směrodatná odchylka		<b>0,2</b>	<b>0,3</b>		<b>6</b>	

**PŘÍLOHA P IV: NAMĚŘENÉ HODNOTY DLE NORMY UL94V**Tabulka PIV-1: *Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 0*

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	0	8,3	Ano	Ano
	0	9,6	Ano	Ano
	0	8,5	Ano	Ano
	0	9,1	Ano	Ano
	0	7,8	Ano	Ano
Průměr		<b>8,7</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,7</b>		

Tabulka PIV-2: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 1

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	1A	8	Ano	Ano
	1A	5	Ano	Ano
	1A	4	Ano	Ano
	1A	6	Ano	Ano
	1A	4	Ano	Ano
Průměr		<b>6</b>		
Směrodatná odchylka		<b>2</b>		
	1B	8	Ano	Ano
	1B	5	Ano	Ano
	1B	3	Ano	Ano
	1B	7	Ano	Ano
	1B	6	Ano	Ano
Průměr		<b>6</b>		
Směrodatná odchylka		<b>2</b>		
	1C	9	Ano	Ano
	1C	5	Ano	Ano
	1C	4	Ano	Ano
	1C	4	Ano	Ano
	1C	6	Ano	Ano
Průměr		<b>6</b>		
Směrodatná odchylka		<b>2</b>		

Tabulka PIV-3: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 2

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	2A	2,2	Ano	Ano
	2A	2,0	Ano	Ne
	2A	2,0	Ano	Ano
	2A	1,7	Ano	Ano
	2A	2,5	Ano	Ano
Průměr		<b>2,2</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,3</b>		
	2B	3,7	Ano	Ano
	2B	2,0	Ano	Ne
	2B	2,7	Ano	Ano
	2B	2,4	Ano	Ne
	2B	3,9	Ano	Ano
Průměr		<b>3,0</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,8</b>		
	2C	5,4	Ano	Ano
	2C	2,6	Ano	Ne
	2C	2,4	Ano	Ne
	2C	4,1	Ano	Ano
	2C	3,0	Ano	Ne
Průměr		<b>3,5</b>		
Směrodatná odchylka		<b>1,2</b>		

Tabulka PIV-4: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 3

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	3A	1,5	Ano	Ano
	3A	2,1	Ano	Ano
	3A	3,2	Ano	Ano
	3A	2,4	Ano	Ano
	3A	3,8	Ano	Ano
Průměr		<b>2,6</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,9</b>		
	3B	4,2	Ano	Ano
	3B	4,6	Ano	Ano
	3B	4,8	Ano	Ano
	3B	4,1	Ano	Ano
	3B	3,5	Ano	Ano
Průměr		<b>4,3</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,5</b>		
	3C	1,6	Ano	Ano
	3C	2,4	Ano	Ano
	3C	2,5	Ano	Ano
	3C	2,3	Ano	Ano
	3C	3,0	Ano	Ano
Průměr		<b>2,4</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,5</b>		

Tabulka PIV-5: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 4

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	4A	2,4	Ano	Ano
	4A	2,7	Ano	Ano
	4A	2,2	Ano	Ano
	4A	2,4	Ano	Ano
	4A	1,9	Ano	Ano
Průměr		<b>2,4</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,3</b>		
	4B	3,1	Ano	Ano
	4B	2,2	Ano	Ano
	4B	4,0	Ano	Ano
	4B	2,6	Ano	Ano
	4B	3,0	Ano	Ano
Průměr		<b>3,0</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,7</b>		
	4C	1,24	Ano	Ano
	4C	1,32	Ano	Ano
	4C	1,46	Ano	Ano
	4C	1,35	Ano	Ano
	4C	1,48	Ano	Ano
Průměr		<b>1,37</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,10</b>		

Tabulka PIV-6: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 5

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	5A	2,6	Ano	Ano
	5A	3,5	Ano	Ano
	5A	4,0	Ano	Ano
	5A	3,1	Ano	Ano
	5A	3,5	Ano	Ano
Průměr		<b>3,4</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,5</b>		
	5B	4,06	Ano	Ano
	5B	4,05	Ano	Ano
	5B	4,02	Ano	Ano
	5B	3,63	Ano	Ano
	5B	4,10	Ano	Ano
Průměr		<b>3,97</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,19</b>		
	5C	5,3	Ano	Ano
	5C	5,2	Ano	Ano
	5C	4,7	Ano	Ano
	5C	4,8	Ano	Ano
	5C	5,0	Ano	Ano
Průměr		<b>5,0</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,2</b>		

Tabulka PIV-7: Naměřené hodnoty dle normy UL94V pro vzorek 6

	Vzorek	Doba hoření po 10s zapalování [s]	Okapává	Zapálení papíru
	6A	5,63	Ano	Ano
	6A	5,79	Ano	Ano
	6A	5,51	Ano	Ano
	6A	5,48	Ano	Ano
	6A	5,66	Ano	Ano
Průměr		<b>5,61</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,12</b>		
	6B	3,03	Ano	Ano
	6B	3,43	Ano	Ano
	6B	3,12	Ano	Ano
	6B	3,38	Ano	Ano
	6B	3,32	Ano	Ano
Průměr		<b>3,26</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,17</b>		
	6C	1,12	Ano	Ano
	6C	1,28	Ano	Ano
	6C	1,01	Ano	Ano
	6C	1,30	Ano	Ano
	6C	1,19	Ano	Ano
Průměr		<b>1,18</b>		
Směrodatná odchylka		<b>0,12</b>		