



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# VÝVOJ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI DRUHOTNÝCH TEXTILNÍCH VLÁKEN NIŽŠÍ KVALITY

DEVELOPMENT OF INSULATION MATERIALS BASED ON SECONDARY TEXTILE FIBERS  
OF LOWER QUALITY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jana Mlynářová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Jana Mlynářová
<b>Název</b>	Vývoj izolačních materiálů na bázi druhotných textilních vláken nižší kvality
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr.h.c.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

[1] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X

[2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.

[3] Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., Paiva, A., Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution, Construction and Building Materials, Volume 38, January 2013, Pages 155-160, ISSN 0950-061

[4] Hadded, A., Benltoufa, S., Fayala, F., Jemni, A., Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating, Journal of Building Engineering, Volume 5, March 2016, Pages 34-40, ISSN 2352-7102

[5] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce se bude věnovat možnostem využití druhotných textilních vláken nižší kvality pro výrobu tepelně a akusticko izolačních materiálů s možným použitím ve stavebnictví. Cílem bude především ověření možnosti využití recyklovaných vláken získávaných ze sběrného textilu a vývoj izolačních rohoží, které by měly parametry srovnatelné s klasickými izolanty na trhu. Dále se bude jednat o návrh vhodných opatření k modifikaci reakce na oheň těchto izolantů (případně dalších vlastností), aby je bylo možné využít ve stavebních konstrukcích v oblasti občanské výstavby. V rámci praktické části práce bude provedena prototypová výroba izolantu, který bude následně upracován a modifikován a bude prakticky provedeno ověření klíčových vlastností i účinného zlepšení reakce na oheň. V závěru práce bude provedeno celkové vyhodnocení a formulace obecných závěrů využitelných pro stavební praxi. Doporučený rozsah 60-80 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na vhodnou úpravu tepelných a akustických izolací na bázi recyklovaných textilních vláken nižší kvality tak, aby došlo ke zlepšení jejich reakce na oheň. Cílem je najít účinný retardér hoření a ověřit vhodný způsob aplikace retardéru hoření pro tento typ izolantu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Textilní vlákna, textilní odpad, hoření, retardéry hoření, hoření textilních vláken, reakce na oheň, vláknité izolační materiály, tepelné a akustické izolační materiály.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is focused on a suitable modification of acoustic and thermal insulation materials from recycled textile fibres of lower quality due to improvement of their reaction to fire. The aim is to find an effective flame retardant and to verify suitable method of flame retardant application onto this type of insulation material.

## **KEYWORDS**

Textile fibres, textile waste, combustion, flame retardants, combustion of textile fibres, reaction to fire, fibrous insulation materials, thermal and acoustic insulation materials.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Jana Mlynářová *Vývoj izolačních materiálů na bázi druhotných textilních vláken nižší kvality*. Brno, 2021. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj izolačních materiálů na bázi druhotných textilních vláken nižší kvality* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 15. 1. 2021

---

Bc. Jana Mlynářová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vývoj izolačních materiálů na bázi druhotných textilních vláken nižší kvality* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

---

Bc. Jana Mlynářová  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za jeho čas, odborné rady a pomoc během vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Vítězslavu Novákovi a Ing. Janu Bubeníkovi za pomoc s měřením v praktické části. Mé díky patří i mé rodině a příteli za podporu při studiu.

# Obsah

I.	Úvod .....	10
II.	Teoretická část práce.....	12
1.	Tepelně izolační materiály .....	12
1.1	Druhy tepelně izolačních materiálů .....	14
2.	Požadavky na vlastnosti izolačních materiálů .....	15
2.1	Legislativní předpisy v České republice pro oblast stavebních izolačních výrobků .....	15
2.2	Požadavky tepelně izolační.....	18
2.3	Požadavky na požární odolnost .....	18
2.4	Evropské předpisy pro tepelné a akustické izolace z recyklovaných textilních vláken .....	19
3.	Odpadní textilní vlákna .....	19
3.1	Složení odpadního textilu.....	21
3.2	Cirkulární ekonomika .....	21
4.	Typy textilních vláken .....	23
4.1	Rostlinná textilní vlákna .....	23
4.1.1	Bavlna .....	24
4.1.2	Konopí.....	24
4.1.3	Len .....	25
4.2	Živočišná textilní vlákna .....	25
4.3	Syntetická textilní vlákna.....	26
4.3.1	Polyamidová vlákna.....	27
4.3.2	Polyesterová vlákna .....	28
4.3.3	Akrylová a modakrylová vlákna .....	28
4.3.4	Polyolefinová vlákna.....	29
5.	Hoření textilních vláken .....	29
5.1	Rozklad celulózy a polyesteru vlivem zvýšené teploty.....	33
5.2	Retardanty hoření .....	35
6.	Recyklace textilních odpadů.....	38
6.1	Třídění textilních odpadů.....	40
6.2	Čištění.....	41
6.3	Sekání.....	42
6.4	Trhání a rozvlákňování.....	42
III.	Praktická část .....	44
7.	Cíl práce .....	44
8.	Metodika práce .....	44



9.	Zkušební vzorky .....	47
9.1	Izolační materiál.....	47
9.2	Zvolené retardanty hoření .....	48
9.3	Příprava vzorků .....	49
10.	Prováděné zkoušky .....	54
10.1	Stanovení lineárních rozměrů .....	55
10.2	Stanovení tloušťky .....	55
10.3	Stanovení objemové hmotnosti.....	56
10.4	Stanovení reakce na oheň.....	56
10.5	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	59
10.6	Stanovení činitele zvukové pohltivosti .....	59
11.	Vyhodnocení zkoušek .....	60
11.1	Stanovení reakce na oheň.....	60
11.2	Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti.....	69
11.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	70
11.4	Stanovení činitele zvukové pohltivosti .....	71
12.	Závěr .....	72
	Seznam použité literatury .....	75

## I. Úvod

Produkce odpadu se v přímé úměře zvyšuje s nárůstem populace. Rovněž roste i tendence věci vyhazovat před tím, než nastane opravdový konec jejich funkčnosti. Tento jev se velmi úzce týká textilu, který podléhá měnícím se trendům [1]. Dle dostupných informací se v České Republice vyhodí ročně 200 tisíc tun textilu, z toho 97 % končí na skládce. Pouze 3 % odpadního textilu se v současné době recykluje, a to představuje obrovský potenciál pro zlepšení situace a jeho zpětného využívání jako druhotné suroviny [2]. K tomuto zlepšení ale pravděpodobně dojde až s povinností textilní odpad třídít, a tato povinnost by se mohla stát platnou až 1. 1. 2025. Zatím Ministerstvo průmyslu a obchodu nařídilo monitorování této komodity [3].

Pokud sběrový textil není využit na charitativní účely, je dále zrecyklován dle materiálu na úklidový textil (hadry), výplňový textil, čalounění, příkrývky, filtrační textilie, vycpávky autosedaček, geotextilie, ochranné textilie a vegetačně retenční desky [2, 4, 5]. Mimo sběrový textil vzniká velké množství textilního odpadu i při výrobě samotných surovin pro textilní průmysl a při výrobě technického textilu (např. využívaného v automotive a dalších průmyslových odvětvích). V ČR jsou izolační materiály z odpadních textilních vláken pro aplikace ve stavebnictví předmětem výzkumu a vývoje, jelikož je potřeba splnit podmínky, které udávají pro tyto výrobky platné legislativní předpisy při jejich uvádění na trh a je poměrně obtížné tyto izolanty v ČR certifikovat pro oblast stavebnictví. Americká firma Bonded Logic Inc. a britská firma Recovery Insulation Ltd. v současné době nabízí tepelné a akustické izolace na bázi odpadních bavlněných vláken, které mají srovnatelné akustické a tepelně izolační vlastnosti běžně používaných izolací v ČR. Množství odpadních bavlněných vláken v těchto produktech se pohybuje mezi 80 % a 85 %. Obě firmy nabízejí tyto izolace v podobě rohoží a některé produkty britské firmy Recovery Insulation Ltd. jsou dostupné i ve formě volných vláken pro aplikaci foukáním. Použití těchto izolací je především na výplňovou tepelnou izolaci stěn ve dřevostavbách, izolace podlah a šikmých střech [6, 7].



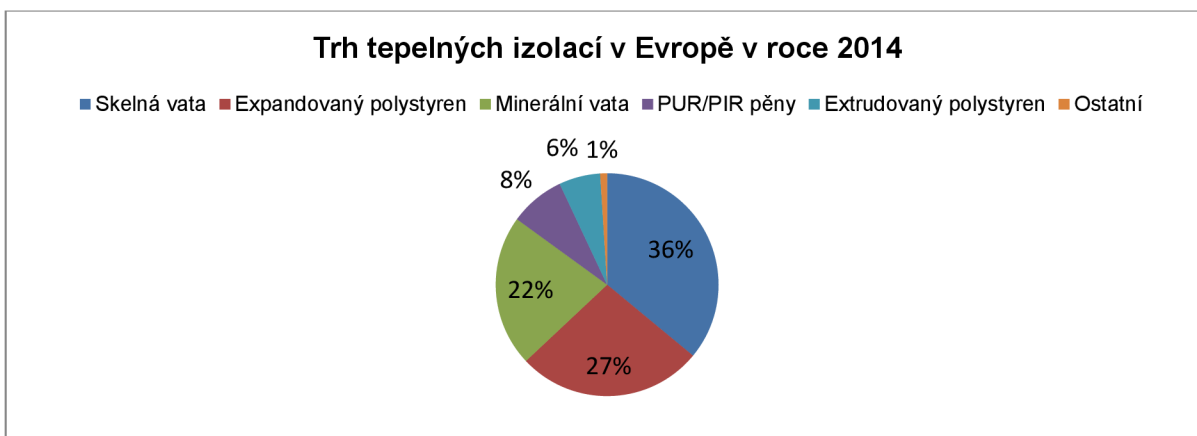
Obrázek 1 - Tepelně akustická izolace UltraTouch™ od firmy Bonded Logic Inc.

[6]



Obrázek 2 - Tepelná izolace Inno-Therm od firmy Recovery Insulation Ltd. [7]

Provoz a údržba staveb jsou společně s automobilovým průmyslem právem považovány za největší spotřebitele energie na světě. Předpokládá se, že vytápění staveb je zodpovědné za 40 % světové spotřeby energie, 25 % světové spotřeby vody a 40 % spotřeby nerostných zdrojů. Vytápění budov a teplá voda jsou v moderní civilizaci samozřejmostí a tyto činnosti produkují třetinu světových emisí CO<sub>2</sub>. Dobrý izolační materiál může značně přispět k úspoře energie, a pokud navíc bude vyroben z recyklovaného materiálu, může se z velké části podílet na šetření zdrojů a redukci emisí CO<sub>2</sub> [1]. Další výhodou používání materiálů z recyklovaných surovin je přispění k rozvoji cirkulární ekonomiky. Zatím jsou ve stavebnictví nejpoužívanější izolace z klasických materiálů, jako jsou minerální vaty a plastické pěny jako expandovaný polystyren a polyuretanové pěny. I když je znatelná snaha o vývoj a používání alternativních izolačních materiálů, na objemu spotřeby je nárůst znatelný pouze minimálně [8]. Procentuální zastoupení jednotlivých typů tepelných izolací na trhu v Evropě za rok 2014 je uveden níže.



**Graf 1 - Procentuální zastoupení tepelných izolací na evropském trhu za rok 2014 [8]**

Tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci na téma Vývoj izolačních materiálů z druhotných textilních vláken. Na základě teoretické rešerše a praktických výsledků této bakalářské práce, jsou v této diplomové práci konkrétněji popsány problémy, které ve vývoji těchto izolačních materiálů nastávají.

## **II. Teoretická část práce**

### **1. Tepelně izolační materiály**

Tepelné izolace se vyznačují nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a většinou také nízkou objemovou hmotností. V případě tepelných izolací je nízká objemová hmotnost způsobena velmi vysokou otevřenou nebo uzavřenou pórovitostí a výrazně nižším podílem materiálové kostry na celkovém objemu, než je tomu u materiálů konstrukčních. V pórech izolačních materiálů se většinou nachází vzduch, který má sám o sobě velmi dobré tepelně izolační i akustické izolační vlastnosti. Vzduch v klidu má při teplotě 20 °C hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,025 W/(m·K). Tepelně izolační materiály zadržují vzduch v pórech (např. expandovaný polystyren) nebo mezi vlákny (vláknité tepelně izolační materiály). Kvůli tomu, že má objemová hmotnost vliv na součinitel tepelné vodivosti, je při vývoji izolačních materiálů snaha o vysoké mechanické vlastnosti při co nejnižší objemové hmotnosti [9].

Kromě objemové hmotnosti mají na součinitel tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů vliv tyto faktory:

- Pórovitost
- Vlhkost
- Směr tepelného toku neizotropních látek
- Chemické složení
- Teplota
- Aj. [9]

Definice tepelně izolačního materiálu je podle normy ČSN 73 0540-1: Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie takový materiál, který výrazně omezuje šíření tepla, a má hodnotu součinitele tepelné vodivosti menší než  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [10]. Jak již z definice vyplývá, tyto materiály jsou důležité pro zamezení úniku tepla z budovy nebo vniknutí tepla do budovy (v létě), a výrazně se tak podílejí na celkové spotřebě energie budovy na vytápění a chlazení a přispívají k tepelné pohodě uvnitř obytných prostor.

## 1.1 Druhy tepelně izolačních materiálů

Tepelné izolace je možné rozdělit podle několika kritérií, ale nejčastěji se dělí dle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny.

Tabulka 1 – Materiálové rozdělení tepelných izolací a jejich vybrané vlastnosti [11]

Skupina materiálů	Materiál	Objemová hmotnost $\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m·K)]	Třída reakce na oheň dle ČSN EN 13 501-1
Pěnoplastické látky	Pěnový polystyren	30	0,035	E
	Extrudovaný polystyren	30	0,030	
	Pěnový polyuretan	35	0,027	E
	Pěnový polyethylen	25	0,026	F
	Pěnění pryskyřice	40	0,040	nespecifikováno
	Pěnění PVC	60	0,043	nespecifikováno
Vláknité materiály	Skleněná vlákna	50	0,038	A1, A2
	Minerální vlákna	75	0,037	A1
	Syntetická vlákna	160	0,065	nespecifikováno
	Izolace na bázi ovčí vlny	30	0,039	nespecifikováno
Pěnění silikáty	Pěnové sklo	120	0,044	A1
Minerální materiály	Expandovaný perlit	75	0,060	A1
	Expandovaný vermikulit	100	0,065	
	Strusková pemza	500	0,130	
	Keramzit	350	0,110	
Materiály na bázi dřeva a přírodních vláken	Piliny a mineralizované hobliny	140	0,060	nespecifikováno
	Sláma a rákos	70	0,050	nespecifikováno
	Korek a korkové desky	150	0,058	nespecifikováno
	Dřevovláknité a dřevotřískové desky	400	0,092	B, C, D, E
Materiály na bázi celulózových vláken	Drcený mineralizovaný papír	30	0,029	C, E, D (závisí na pojivu)
	Desky z asfaltového papíru	60	0,065	
Materiály nové generace	Kalciumsilikáty	300	0,063	nespecifikováno
	Vakuové izolace	10	0,008	nespecifikováno

Dalším kritériem, podle kterého je možné tepelně izolační materiály rozdělit, je jejich použití, a to na:

- vnější izolace obvodového pláště,
- izolace střešního pláště,
- vnitřní vodorovné a svislé konstrukce,
- vnitřní izolace obvodového pláště,
- speciální aplikace [12].

Další dělení je podle tvaru výrobku na:

- **Deskové izolace:** Stálý výrobní rozměr výrobku je definován jeho délkou, šířkou a tloušťkou (polystyren, minerální vata).
- **Izolační rohože:** Stálý výrobní rozměr výrobku je definován jeho šířkou a tloušťkou a je dodáván v rolích (minerální a skelná vlna, konopí, len).
- **Sypaná izolace:** Tento typ izolace je možné přidat do betonové směsi a zlepšit tak jeho tepelně izolační vlastnosti, anebo jím vyplnit dutiny v konstrukci (perlit, keramzit, expandovaný vermikulit nebo sypaný polystyren).
- **Foukaná izolace:** Nejčastěji jsou to foukaná celulózová vlákna. Při tomto typu aplikace izolací se netvoří spáry a to přispívá k dobrým tepelně izolačním vlastnostem [12].

## 2. Požadavky na vlastnosti izolačních materiálů

Od požadavků, které jsou na izolační materiály legislativně kladeny, se odvíjí jejich požadované a klíčové vlastnosti. Další požadavky pak dále plynou z předpokládaného využití izolantů ve stavebních konstrukcích. V této kapitole jsou uvedeny klíčové legislativní předpisy, které určují požadavky na konstrukce a jednotlivé materiály, a jejich respektování je povinné.

### 2.1 Legislativní předpisy v České republice pro oblast stavebních izolačních výrobků

Znění zákonů, což jsou základní předpisy, je dále upřesňováno ve vyhláškách nebo možných nařízeních vlády. V příslušných normách jsou pak uváděny konkrétní

technické požadavky na výrobky. Dodržování požadavků uváděných v normách se stává povinné tehdy, pokud se na tyto normy odvolává zákon, související vyhláška nebo případné nařízení vlády, a taková norma je pak norma požadavková. Dodržování norem je jinak pouze doporučené. Normy, které jsou závazné pro certifikaci výrobků, se nazývají výrobkové. Výrobkové normy dále konkretizují požadavky na výrobky, jejich specifické vlastnosti, označování jejich parametrů atd. Postup pro zkoušení materiálů a pro stanovování jejich vlastností je uveden v normách zkušebních.

Pro ujasnění legislativních předpisů pro oblast stavebních izolačních výrobků je nutno vycházet ze **Zákona č. 183/2006 Sb. [13], o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů**, protože se jedná o základní předpis pro veškeré činnosti spadajícími do stavebnictví. Zákon v § 156 – Požadavky na stavby říká, že pro stavbu mohou být navrženy a použity pouze takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti z hlediska způsobilosti stavby pro navržený účel stanovují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní základní požadavky na stavby. Dále se odvolává na **Vyhlášku č. 268/2009 Sb.**, která tyto požadavky specifikuje. Stavba tedy musí dle této vyhlášky splnit základní požadavky, kterými jsou:

- a) mechanická odolnost a stabilita,
- b) požární bezpečnost,
- c) ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí,
- d) ochrana proti hluku,
- e) bezpečnost při užívání,
- f) úspora energie a tepelná ochrana [14].

V této diplomové práci je důležité upřesnit především následující body:

Ad b) **Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb**: Stavební výrobky určené k zabudování do staveb a stavební konstrukce se zařazují do tříd A až F podle **ČSN EN 13 501-1 [15]**, a to následovně:



- **Třída F:** Nemohou být klasifikovány do žádné z níže uvedených tříd.
- **Třída E:** Výrobky schopné odolávat působení malého plamene po krátkou dobu bez jeho významného rozšíření.
- **Třída D:** Výrobky schopné odolávat působení malého plamene po delší dobu bez jeho významného rozšíření. Také jsou schopny odolat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a uvolňování tepla.
- **Třída C:** Obdobně jako třída D, jen vyhovuje přísnějším požadavkům a výrobky jsou schopny odolat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu s omezením rozšíření plamene.
- **Třída B:** Obdobně jako třída C, jen vyhovuje přísnějším požadavkům.
- **Třída A2:** Výrobky vyhovují všem kritériím pro třídu B a k tomu za podmínek rozvinutého požáru nijak nepřispívají ke zvýšení požárního zatížení ani růstu požáru.
- **Třída A1:** Výrobky nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stadiu a jsou automaticky považovány za vyhovující pro všechny nižší třídy [16].

Ad c) **Zákon č. 258//2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů ve znění pozdějších předpisů v § 76** říká, že výrobky, které osoba při podnikatelské činnosti vyrábí, dováží nebo uvádí na trh nebo do oběhu, a výrobky, které mají být schváleny orgánem ochrany veřejného zdraví, jsou tedy schváleny. Orgán zajišťující veřejnou ochranu zdraví na celostátní úrovni je Ministerstvo zdravotnictví, regionálně jsou to krajské hygienické stanice. Některé povinnosti související s ochranou proti hluku taky přebírá Ministerstvo obrany, vnitra, pro místní rozvoj, životního prostředí a dále i krajské úřady [17]. Bezpečný výrobek je dle **Zákona č. 102/2001 Sb.** ten, který za běžných nebo rozumně předvídatelných podmínek užití nepředstavuje po dobu stanovenou výrobcem nebo po dobu obvyklé použitelnosti nebezpečí, nebo jehož užití představuje pro spotřebitele vzhledem k bezpečnosti a ochraně zdraví pouze minimální nebezpečí při užívání výrobku [18].

Ad f) **Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů v §** – udává, že budova by měla být navržena s co nejnížší možnou spotřebou energie tak, aby bylo přihlédnuto na klimatické podmínky dané lokality.

Rovněž informuje o povinnostech vázaných k průkazu energetické náročnosti budov [19].

## **2.2 Požadavky tepelně izolační**

Požadavky na tepelně izolační materiály se odvíjejí od tepelně technických požadavků na stavební konstrukce. Norma ČSN 73 0540-2 udává, že každá konstrukce musí splňovat požadavek na maximální hodnotu součinitele prostupu tepla  $U$ , který norma specifikuje podle toho, o jakou konstrukci se jedná. Součinitel prostupu tepla  $U$  je veličina, která vyjadřuje, jaké množství energie za jednotku času proteče jedním metrem čtverečním dané konstrukce při tepelném rozdílu jednoho Kelvinu. Na hodnotu součinitele prostupu tepla konstrukce má vliv především tepelná vodivost jednotlivých materiálových vrstev a jejich tloušťka a počet [20].

Tepelná vodivost je charakterizována veličinou součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , který je definován jako množství tepla, které při ustáleném tepelném toku projde za jednotku času materiálem o jednotkové tloušťce při jednotkovém teplotním spádu. Z definice vyplývá, že je to schopnost materiálu vést teplo. Norma ČSN 73 0540-1 říká, že tepelně izolační materiál má hodnotu součinitele tepelné vodivosti menší než  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [10]. Je tedy zřejmé, že použitím tepelně izolačního materiálu ve vícevrstvé konstrukci, je možné příznivě ovlivnit hodnotu součinitele prostupu tepla.

## **2.3 Požadavky na požární odolnost**

I požadavky na požární vlastnosti tepelně izolačních materiálů se odvíjejí od požadavků na požární odolnost konstrukcí. Tyto požadavky jsou dány normou ČSN 73 0810: Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení a normou ČSN 73 0802: Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty. Podle těchto norem je požární odolnost konstrukce doba v minutách, kdy posuzovaná konstrukce si je schopna zachovat své charakteristické vlastnosti, tedy nedosáhne mezních stavů [21, 22]. Materiály zabudované do stavebních konstrukcí pak musí splňovat požadovanou třídu reakce na oheň, a to dle druhu konstrukce.

Již zmíněná norma ČSN EN 13 501-1 zařazuje stavební výrobky podle jejich reakce na oheň [16]. Tato norma se odkazuje především na normu ČSN EN ISO 11925-2, která popisuje zkoušku malým zdrojem plamene. Pokud materiál vyhoví požadavkům uvedených v této normě, řadí se do třídy E, pokud nevyhoví, pak se řadí do třídy F [23]. Pro zařazení materiálu do vyšších tříd rozhodují další normy.

#### **2.4 Evropské předpisy pro tepelné a akustické izolace z recyklovaných textilních vláken**

V ČR nejsou v této době jasně zavedeny a definovány požadavky pro tepelné a akustické izolace z recyklovaných textilních vláken, protože legislativa na tyto produkty není vytvořena. Tyto výrobky se nejvíce blíží popisu v European Assessment Document EAD 040288-00-1201 vydaným European Organisation for Technical Assessment (EOTA). Tento dokument se týká průmyslově vyrobených tepelných a akustických izolací z polyesterových vláken. Dle definice v tomto dokumentu se jedná o tepelné a akustické izolace z termicky spojených polyesterových vláken, z nichž část může být recyklována. Produkty mohou nebo nemusí být povrchově ošetřeny a jsou dodávány ve formě matrací, desek nebo rolí. Dále se jedná o produkty, které nebyly zahrnuty do harmonizovaných evropských standardů EN. Tento předpis stanovuje, podle kterých norem mají být vlastnosti těchto izolací zkoušeny, a ve kterých normách se nachází závazné hodnoty, které je potřeba dodržet [24]. V případě, že je materiál tvořen z vláken jiných s podílem vláken přírodních, je možné pro jeho certifikaci alternativně využít EAD 040005-00-1201 Průmyslově vyráběné výrobky pro tepelnou a/nebo zvukovou izolaci z rostlinných nebo živočišných vláken [25].

### **3. Odpadní textilní vlákna**

Pro možnosti vývoje materiálů z recyklovaných textilních vláken jsou důležité i některé legislativní předpisy týkající se odpadů. Především se jedná o legislativní definici odpadu, jak jej členit a nakládat s ním. Na základě těchto informací je možné i vytipovat, v jakých skupinách odpadu se budou odpadní textilní vlákna nacházet, a kdy přestávají být odpadem a stává se z nich vedlejší produkt.

**Zákon č. 541/2020 Sb. nabyl účinnosti 1. 1. 2021 a zrušil tak starý Zákon o odpadech 185/2001 Sb.** Nový Zákon o odpadech definuje v § 4 pojem odpad jako každou movitou věc, které se osoba zbavuje, má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Dále říká, že osoba má úmysl zbavit se movité věci, pokud tuto věc není možné používat k původnímu účelu. V tomto paragrafu je uvedeno, kdy nastává povinnost osoby zbavit se movité věci a jak postupovat při pochybnostech o tom, zda je movitá věc odpadem. **Podle tohoto zákona se k 1. 1. 2021 zrušuje Vyhláška č. 93/2016 – Katalog odpadů**, podle které byli původci odpadu a oprávněné osoby povinny začlenit odpad. **Nový Zákon o odpadech** v § 6 ale udává, že odpad se zařazuje do kategorie odpadu, a to jako nebezpečný odpad nebo jako ostatní odpad, a druhu odpadu vymezeného v Katalogu odpadů. Katalog odpadů má vyhláškou stanovit Ministerstvo životního prostředí. Z nového Zákona o odpadech vyplývá, že **Vyhláška č. 93/2016 byla zrušena**, ale zatím Ministerstvo životního prostředí neuvedlo v platnost vyhlášku novou [26, 27].

Podle starého Zákona o odpadech jsou původce a oprávněná osoba povinni začlenit odpad podle **Vyhlášky č. 93/2019 Sb. – Katalog odpadů**. Podle této vyhlášky je možné určit možné zdroje odpadních textilních vláken:

- **04 Odpad z kožedělného, kožešnického a textilního průmyslu:** 04 02 Odpady z textilního průmyslu – 04 02 09 Odpady z kompozitních tkanin (impregnované tkaniny, elastomer, plastomer), 04 02 21 Odpady z nezpracovaných textilních vláken, 04 02 22 Odpady ze zpracovaných textilních vláken,
- **15 Odpadní obaly; absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené:** 15 01 Obaly – 15 01 09 Textilní obaly,
- **20 Komunální odpady (odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů), včetně složek odděleného sběru:** 20 01 Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01) – 20 01 10 Oděvy, 20 01 11 Textilní materiály [27, 28].

### **3.1 Složení odpadního textilu**

Zatím neexistuje zastřešující organizace, která by sledovala odpadní textil jako komoditu, a tak i jeho složení zůstává blíže neurčené. Dle Ministerstva průmyslu a obchodu bude povinnost třídít textilní odpad do 1. 1. 2025. Podle Politiky druhotných surovin ČR v období let 2019 – 2022 je komodita textil monitorována a tato skutečnost přinese nové a cenné poznatky o opravdovém složení textilního odpadu a jeho vyprodukovaném množství. V roce 2022 proběhne aktualizace Politiky druhotných surovin ČR a do strategického dokumentu bude tato komodita již začleněna. Vzhledem k rozmanitosti materiálů pro výrobu textilních vláken je možné předpokládat, že složení odpadního textilu bude značně nehomogenní a zastoupení jednotlivých typů vláken v této druhotné surovině se bude lišit. Obecně se v textiliích a oděvech vyskytuje nejčastěji bavlna, polyester, akrylová, polyamidová a polypropylenová vlákna [3, 29]. Odpadní textil z textilního průmyslu na tom bude lépe než sběrové textilní odpady, co se týče možnosti předpokládat jeho složení.

Ministerstvo Průmyslu a obchodu uvádí, že každý občan ČR vyprodukuje ročně 10 kg textilního odpadu a více než 90 % z toho není dále využito. V ČR se tedy ročně vyhodí kolem 107 tisíc tun textilu a další zdroje uvádí, že se jedná až o 200 tisíc tun [3, 30].

Textilie jsou velmi komplexním materiálem. Složení textilního odpadu nezáleží jen na typu vláken, které se v něm nachází, ale také na jejich chemickém ošetření. Může se jednat o barvy, které jsou zakotveny ve struktuře vlákna, a potisky, membrány a zátěry, které není možné při recyklaci úplně z textilií odstranit. Tyto netextilní zbytky ve směsi recyklovaných vláken mohou představovat značnou změnu některých klíčových vlastností, především jejich reakci na oheň [31].

### **3.2 Cirkulární ekonomika**

Jak již bylo nastíněno v úvodu této diplomové práce, využití odpadního textilu by bylo velmi přínosné pro životní prostředí a mohlo by pozitivně ovlivnit cirkulární ekonomiku. Současný stav hospodaření se zdroji má spíše charakteristiky ekonomiky lineární a dle dostupných studií a předpokladu odborníků není tento

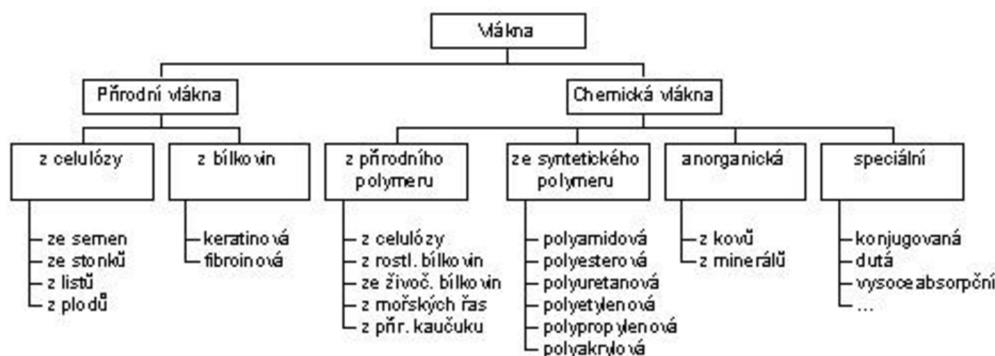
stav dlouhodobě udržitelný, a tak vznikly trendy jako eko-efektivita a 3 R – reduce, reuse, recycle (vlastní překlad: zmenšit spotřebu a objem odpadu, znovu použít, zrecyklovat). Cirkulární ekonomika staví na myšlenkách těchto trendů a je popisována jako snaha o co nejdelší kolování zdrojů v co nejlepší kvalitě po nejdelší možné dobu. Kromě značné redukce množství produkovaného odpadu by při následování principů cirkulární ekonomiky mohlo dojít ke znatelnému snížení emisí CO<sub>2</sub>. Některé studie poukazují i na možnost tvorby finančních úspor, pokud by došlo k zavedení principů cirkulární ekonomiky a technologické revoluci. Zároveň je ale největší tržní překážkou získání druhotných surovin v požadované kvalitě, které by byly porovnatelné s cenou surovin primárních. Dalším problémem, který nastává u snahy aplikovat principy cirkulární ekonomiky ať už ve firmách nebo ve společnosti, je špatná dostupnost vhodných technologií [32, 33, 34, 35]. Tyto zmiňované problémy se odpadního textilu úzce týkají, jelikož z rešerše pro účely této diplomové práce a bakalářské práce, na kterou tato diplomová práce navazuje, vyplývá, že pro kvalitu této druhotné suroviny je důležité třídění textilního odpadu kvůli jeho nehomogenosti a obsahu netextilních součástí, které působí problémy z hlediska hořlavosti této suroviny. Třídění probíhá ručně a automatizován je v některých případech jen doprava textilního odpadu k pracovníkovi pomocí pásových dopravníků. Jelikož je pro tento účel tedy využívána lidská síla, narůstá tato surovina na ceně. Chybí zde tedy i vhodné technologie pro tento krok recyklace [36].



Obrázek 3 - Schéma cirkulární ekonomiky vs. schéma lineární ekonomiky [37]

## 4. Typy textilních vláken

Základní dělení textilních vláken je podle jejich vzniku na vlákna přírodní a umělá, kam patří vlákna chemická a syntetická. Chemická vlákna se získávají z přírodních polymerů chemickým procesem a vlákna syntetická se vyrábí ze syntetických polymerů. Přírodní vlákna se pak dělí podle jejich původu, a to na rostlinná a živočišná. Tloušťku a délku přírodních vláken je možné ovlivnit pouze nepřímo, kdežto u vláken umělých je možné rozměry vlákna ovlivnit výrobním procesem. Další z možných dělení textilních vláken je podle možnosti jejich zpracování na vlákna spřadatelná (staplová), dlouhá více než 10 mm, vlákna nekonečná, která mohou být dlouhá i několik set metrů, a vlákna nespřadatelná s délkou pod 10 mm, která mají v textilním průmyslu možnost využití pro výrobu netkaných textilií. Typy jednotlivých vláken je od sebe možné rozlišit pod mikroskopem dle vzhledu jejich povrchu, tloušťky a tvaru průřezu. Dalším způsobem jak typ vlákna identifikovat je vystavení vlákna působení ohně. Tato vlastnost je důležitá především z hlediska požární odolnosti, ale lze takto i určit převažující typ textilního vlákna v neznámé tkanině [38, 39].



Obrázek 4 - Rozdělení textilních vláken [40]

### 4.1 Rostlinná textilní vlákna

Rostlinná vlákna jsou tvořena především celulózou, což je základní stavební látka rostlinných primárních buněčných stěn. Zdrojem tohoto typu vláken jsou různé části rostlin, například semena (bavlna), plody (kokos), lodyhy (konopí, len, juta)

či listy (manilské konopí). Vzhledem ke klimatickým podmínkám ve střední Evropě zde byly nejdůležitější línkové rostliny jako len a konopí [38].

#### **4.1.1 Bavlna**

Bavlna je surovina získávaná z bavlníku srstnatého, konkrétně z části této rostliny nazývané osemení. Osemení je kryto právě bílými chlupy bavlněných vláken, které jsou 20 - 60 mm dlouhé a tlusté 12 – 17  $\mu\text{m}$ . Toto vlákno je až z 96 % tvořeno celulózu, proto je nejčistějším zdrojem celulózy na světě a má i speciální uplatnění ve výrobě bankovního papíru a výrobě nitrocelulózy [41]. Pod mikroskopem je možné pozorovat tvar průřezu bavlněného vlákna, které má tvar ledviny, pokud se jedná o bavlnu mercerovanou (ošetřenou hydroxidem sodným pro vylepšení vlastností) má průřez takového vlákna kruhový tvar [39]. Země, které světově produkují nejvíce bavlny na světě, jsou Indie, Čína a následuje USA [42].

Bavlna tvoří téměř polovinu světové produkce textilních vláken, i když v posledních letech došlo i ke značnému rozvoji použití vláken syntetických. Nejčastější použití bavlny v textilním průmyslu je na výrobu triků, džínů a jiných volnočasových či sportovních oděvů. Je známo, že pěstování bavlny je náročné na spotřebu vody a množství pesticidů. Předpokládá se, že na výrobu jednoho trika z bavlny se spotřebuje zhruba 2 500 litrů vody, spotřeba na výrobu jednoho páru džínů je až 8 000 litrů vody. Nároky na spotřebu vody při produkci organické bavlny jsou značně menší, ale tato skutečnost se projeví na její ceně [39, 43].

Díky svým tenkým vláknům má bavlna velmi dobré tepelné izolační vlastnosti. Další vhodné vlastnosti, které dávají bavlně předpoklad k tomu, že tvoří vhodnou surovinu pro izolační materiály, je schopnost regulace vlhkosti ve vnitřním prostředí a akustické izolační parametry. Nevýhodou je v tomto případě již zmiňovaná ekologická náročnost jejího pěstování a zpracování [41].

#### **4.1.2 Konopí**

Konopí je rostlina línková, což znamená, že vlákna se získávají z kůry stonků této rostliny. Složení konopných vláken je ze 75 % celulóza, 18 % hemicelulóza a 4 %



lignin. Konopné vlákno je tmavší a pevnější než vlákno lněné. Vlákno je průměrně dlouhé 20 mm a jeho tloušťka je 22  $\mu\text{m}$  [44]. Produkty získávané z konopí mají pestré využití, mohou to být oleje lisované ze semen využívané v potravinářství a zdravotnictví, mouka mletá ze semen používaná v potravinářství, ale v kontextu této diplomové práce je důležité zmínit vlákna, ze kterých se vyrábí různé textilie, lana, ale i lodní plachty. Oděvy z konopných vláken jsou hrubší, jelikož tato vlákna vykazují větší pevnost a odolnost proti povětrnostním vlivům [41].

### **4.1.3 Len**

Len má rovněž jako konopí variabilní využití a lze zpracovat téměř celou část rostli bez zbytečného odpadu. Ze semen se opět lisuje olej pro kosmetický a farmaceutický průmysl a vylisovaná semena – pokrutina poté slouží jako krmivo pro hospodářská zvířata. Podrcené pazdeří (zdřevnatělá část stonku) rostliny slouží jako podestýlka pro dobytek, palivo a pro aplikace v nábytkářském průmyslu. Základním produktem získávaným z rostliny lnu setého je ale textilní vlákno. Chemické složení lnu je hlavně celulóza z 80 %, dále hemicelulóza z 15 % a ze 4 % pektin. Jednotlivá elementární vlákna se v rostlině vyskytují ve svazcích nazývaných technická vlákna, které jsou tvořeny 15 – 30 elementárními vlákny spojených pektinem. Elementární vlákna mají délku 17 - 40 mm a tloušťku 12 - 17  $\mu\text{m}$  [44].

## **4.2 Živočišná textilní vlákna**

Z hlediska chemického složení jsou živočišná vlákna tvořena keratinem nebo fibroinem. Keratinová vlákna jsou zvířecí srst, tedy ovčí vlna a z těch méně obvyklých to jsou kozí chlupy, které se zpracovávají na látku zvanou kašmír. Fibroinová vlákna se zpracovávají na hedvábí a produkuje je larva bource morušového a některé druhy pavouků [39, 45]. Vzhledem k náplni této diplomové práce bude v následujícím odstavci popsána ovčí vlna, která se ve směsi odpadních textilních vláken bude nacházet ve velmi malém množství, ale její výskyt zde bude pravděpodobnější než výskyt hedvábí nebo kašmíru.

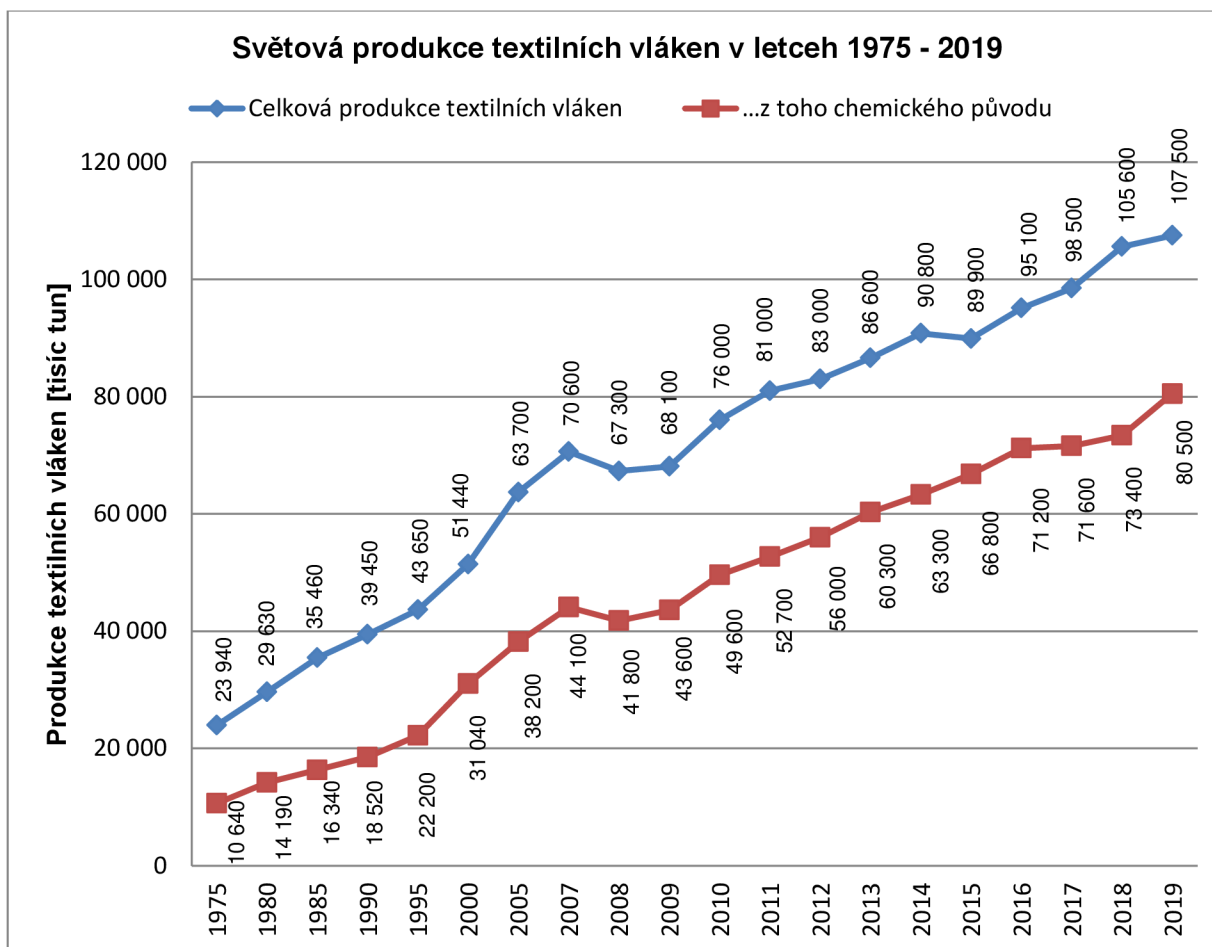
Jak již bylo řečeno, vlákno ovčí vlny je tvořeno živočišnou bílkovinou zvanou keratin. Vlastnosti vlákna se liší dle druhu ovce, ale délka vlákna je řádově 20 –

80 mm a jeho tloušťka 25 – 45  $\mu\text{m}$ . Tloušťka vlákna může být různá a měnit se vzhledem ke směru růstu – ke konci se bude vlákno ovčí vlny ztenčovat. Při pozorování vlákna pod mikroskopem je viditelný jeho šupinovitý povrch a dutinu uprostřed vlákna, která přispívá k jeho tepelně izolačním vlastnostem, které jsou lidstvu známy více než 11 000 let. Součinitel tepelné vodivosti ovčí vlny je 0,038 – 0,050  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Další příznivé vlastnosti ovčí vlny jako textilie jsou termoregulace, odvod potu, prodyšnost, je hypoalergenní a antibakteriální [41].

### 4.3 Syntetická textilní vlákna

Syntetická vlákna jsou vytvořená ze syntetických polymerů a jejich základní jednotkou monomer. Polymery mohou být lineární a rozvětvené. Lineární polymery mají počet jednotek více než 80 a jsou pro výrobu vláken vhodnější než polymery rozvětvené, které jsou pro výrobu vláken vhodné jen omezeně. Monomery pro výrobu těchto vláken jsou syntetizovány z ropy nebo zemního plynu. Syntetická textilní vlákna se obecně vyrábí roztavením (rozpuštěním) granulí daného polymeru do tekuté formy a jeho extrudováním přes zvláknovací trysku, která má otvory velmi malého průměru. Je tedy zřejmé, že délka, velikost průměru a jeho tvar syntetických vláken mohou být upravovány dle žádaného výsledku. Pokud pro uvedení polymeru do tekutého stavu byla použita vysoká teplota a došlo tedy k jeho roztavení, pro převedení vláken zpět do pevného stavu je stačí ochladit. Pokud bylo použito rozpouštědlo, pro vytvrzení vláken je třeba jej odstranit. Poté následují úpravy textury těchto vláken dle jejich požadované aplikace, např. narovnání natahováním nebo úprava textury [42].

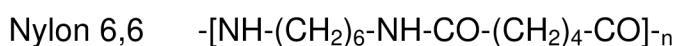
Světová produkce syntetických vláken stále narůstá. Nejvíce světové výroby syntetických textilních vláken zaujímají polyesterová, polyamidová, akrylová a polypropylenová textilní vlákna, která budou podrobněji popsána v následujících odstavcích. V Číně vzniká 68,3 % světové produkce syntetických vláken, následuje Indie s 6,9 % a USA s 3,7 % (údaje z roku 2015) [42]. Vývoj nárůstu světové produkce textilních vláken je možné vidět v následujícím grafu.



Graf 2 - Světová produkce textilních vláken v letech 1975-2019 [46]

### 4.3.1 Polyamidová vlákna

Nejznámější a nejdůležitější polyamidová vlákna jsou známá pod názvy polyamid 6,6, označován jako nylon, a polyamid 6, který se v ČR vyráběl pod názvem Silon. Tato vlákna jsou prvními syntetickými vlákny, která se stala komerčním produktem. Monomery, které jsou v případě polyamidů vázány amidickou vazbou, mají 6 atomů uhlíku. Polyamid 6 je tvořen jedním monomerem a číslo v jeho názvu tedy odpovídá počtu atomů uhlíku na jednom monomeru. Polyamid 6,6 je tvořen dvěma monomery a každý z nich má opět 6 atomů uhlíku, proto má v názvu 6,6 (uvádí se i 6/6). Tyto materiály mají velice podobné vlastnosti, ale nylon 6,6 je odolnější. Nylon 6,6 je kopolymerem kyseliny adipové a diaminohexanu, kdežto nylon 6 se vyrábí polymerizací z kaprolaktamu. Rozdíl v názvu je patrný z funkčních vzorců:



Oproti bavlně je nylon pevnější a dá se pružně natahovat, je lehký a hladký, proto se v kombinaci s elastanem (polyuretan) aplikuje do oděvů určených zejména pro sport. Dále je používán pro výrobu plavek, spodního prádla a silonek. Nylon ale není příliš odolný vůči vlhkosti a UV záření, pokud je těmto vlivům často vystavován, je náchylný na blednutí barev a ztrácí své ostatní vlastnosti [42, 47].

#### **4.3.2 Polyesterová vlákna**

V této skupině syntetických textilních vláken se nachází nejznámější PET vlákna, která zároveň tvoří největší část produkce syntetických vláken. Pokud některé publikace či štítky na oblečení uvádí zkratku PES (polyester) jedná se s největší pravděpodobností právě o PET vlákna, tedy polyetylentereftalát. Do skupiny polyesterových vláken rovněž patří vlákna PTT – polytrimetylentereftalát, PBT – polybutyilentereftalát a PEN – polyetylnaftalát [47].

Polyetylentereftalát vzniká z kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Látky pro výrobu kyseliny tereftalové se získávají z ropy a látky pro výrobu ethylenglykolu ze zemního plynu. Rozvíjí se ale snaha i v této výrobě o využití obnovitelných zdrojů surovin. PET vlákna jsou oproti bavlně pevnější, méně navlhavá a zároveň rychle schnou. Oproti polyamidům nepodléhají UV záření, a proto se ve 100% formě nachází v bytových textiliích jako závěsy a záclony. V kombinaci s bavlnou se nachází v trikách, sukních, šatech a sportovních oděvech. Pokud jsou PET vlákna míchána s vlnou, je to vhodná kombinace pro výrobu pánských obleků. Samotná PET vlákna kromě zmiňovaných závěsů nachází v kravatách, částech jiných oděvů, např. kapsy a podšívky [42, 47].

#### **4.3.3 Akrylová a modakrylová vlákna**

Akrylová a modakrylová vlákna jsou známa pod zkratkou PAN pocházející z celého názvu látky polyakrylonitril, který tato vlákna tvoří. Polyakrylonitril vzniká většinou radikálovou polymerací (iniciace – teplo, ozařování) z akrylonitrilu. Polyakrylonitril nelze zvláknovat z taveniny, protože se rozkládá. Ke zvláknování dochází za mokra ve srážecí lázni, za sucha odpařením rozpouštědla ve vzdušné šachtě nebo kombinací těchto dvou způsobů. Polyakrylonitrilová vlákna jsou ta

vlákna, která mají obsah polyakrylonitrilu větší než 85 %, modakrylová vlákna mají obsah polyakrylonitrilu menší než 85 %. K polyakrylonitrilu jsou přidávány jiné látky za účelem vylepšení vlastností vláken, protože čistá polyakrylonitrilová vlákna jsou tuhá a špatně barvitelná a používají se jen zřídka (koberce) [42, 47].

Akrylová vlákna jsou podobná vlně, a proto i jejich aplikace byla podobná, jejich výhoda oproti vlně navíc byla větší chemická odolnost a byla odolnější vůči oděru. Akrylová vlákna byla často používána v kombinaci s vlnou nebo bavlnou pro výrobu ponožek, nyní jsou však preferovány kombinace s vlny nebo bavlny s nylonem [42, 47].

#### **4.3.4 Polyolefinová vlákna**

Jako polyolefinová vlákna jsou souhrnně označována polyethylenová (PE) a polypropylenová (PP) textilní vlákna. Z hlediska využití těchto vláken se bude následující odstavec věnovat především polypropylenovým textilním vláknům. Původ polypropylenových vláken je opět v neobnovitelných zdrojích – ropě a zemním plynu, protože PP je vyráběn pyrolýzou z etanu a propenu. PP vlákna jsou vytvářena běžným způsobem z taveniny. Výhodou PP vláken je jejich vysoká mechanická odolnost v poměru k jejich nízké ceně. Jejich velkou nevýhodou, kvůli které jsou tato vlákna využívána v oděvech jen omezeně, je jejich špatná barvitelnost. PP vlákna tedy najdou omezené uplatnění ve sportovním oblečení pro cyklisty, a protože jsou PP vlákna lehká a málo navlhavá, tak i speciální lehké outdoorové oblečení [42, 47].

### **5. Hoření textilních vláken**

V moderní civilizaci jsou nároky na bezpečnost lidí stále zvyšovány a není tomu jinak ani u požární bezpečnosti staveb. Aby bylo možné tepelné izolace z druhotných textilních vláken aplikovat do stavebních konstrukcí, je zapotřebí upravit jejich reakci na oheň, která je kvůli vláknité struktuře tohoto materiálu vysoká. K tomu, aby bylo možné správně ošetřit textilní vlákna retardérem hoření, je vhodné znát, jak se jednotlivé typy vláken chovají, jsou-li vystaveny účinkům ohně. Podmínky, které umožňují vznik požáru, jsou teplo, hořlavá látka

a přítomnost kyslíku, nebo taky dostatečný přísun vzduchu. Oheň je chemický proces, který zahrnuje oxidaci, to znamená, že kyslík reaguje s vodíkem a uhlíkem, vzniká tedy voda a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Jedná se o exotermickou reakci, a proto se při požáru produkuje teplo. Požár má 3 fáze – rozvoj hoření, plně rozvinutý požár a fáze rozpadu (vyhoření všech hořlavých materiálů). Čím více se požár rozvíjí, tím více je produkováno tepla, a tím pádem vzrůstá teplota hořlavých látek. Při vysoké teplotě  $500\text{ }^\circ\text{C}$  dojde ke vznícení předmětů v okolí, a to vede k rychlému šíření požáru. Při této teplotě každý polymer uvolní asi 20 % své hmotnosti v podobě oxidu uhelnatého ( $\text{CO}$ ), což je jedovatý plyn. Ve většině případů úmrtí způsobeným požárem dojde právě k otravě jedovatými plyny [48].

Ohřev textilních vláken za přítomnosti kyslíku vede k několika procesům, a to:

- absorpce tepla a ztráta vlhkosti vláken,
- vznik hořlavých plynů vlivem tepelného rozkladu (pyrolýzy) vláken,
- zapálení hořlavého plynu (radikálová reakce mezi kyslíkem v plynné fázi a hořlavým plynem),
- vývin tepla hoření, které dále zvyšuje vznik hořlavých plynů [38].

Dochází tedy k hoření pouze hořlavých plynů (zplodin pyrolýzy). Polymery, které obsahují větší množství vodíkových atomů, mají vysokou hořlavost. Jedná se o celulózu a polyethylen. Menší hořlavost pak mají polymery s aromatickými články a polymery obsahující halogeny [38].

Jedna z veličin, která vyjadřuje hořlavost je limitní kyslíkové číslo LOI (z anglického Limiting Oxygen Index), která udává množství kyslíku v procentech, které je potřebné k hoření materiálu, ve směsi s dusíkem. Nehořlavá vlákna mají hodnotu LOI 26 a více [38, 49].

Tabulka 2 - Hodnoty LOI pro různá vlákna [38, 48]

Klasifikace	Vlákno	LOI [%]
Nehořlavá	Sklo	Nehoří
Tepelně odolná	Teflon	95,0
	Uhlíková vlákna	60,0
Odolná vůči hoření	Nehořlavý polyester	28,0 – 32,0
	Vynilon (PVC)	35,0 – 37,0
	Modakryl	27,0 – 31,0
Hořlavá	Vlna	25,0
	Bavlna	18,4
	Viskóza	18,9
	Nylon 6	20,0 – 21,5
	Nylon 6,6	20,0 – 21,0
	Polyester	20,0 – 21,5
	Polypropylen	18,6
	Akryl	18,2

Z tabulky vyplývá, že vlákna, která se běžně vyskytují v textilním odpadu, jsou hořlavá. V případě, že se jedná o směs přírodních celulóзовých a chemických syntetických vláken, je hořlavost výrazně vyšší, protože pro směs bavlny a polyesteru má hodnotu LOI pouze 17 [38]. Při hoření akrylových vláken navíc dochází k uvolňování jedovatých zplodin [47].

Další veličinou, která popisuje hořlavost materiálu je rychlost uvolňování tepla HRR (z anglického Heat Release Rate), která se obvykle uvádí ve W/tech. V některých publikacích může být tato veličina vztažena i na plochu materiálu ( $W/m^2$ ) nebo na jeho váhu ( $W/g$ ). Udává, jak rychle hoření daného materiálu uvolňuje teplo, a je proto velmi důležitou veličinou při hodnocení požárního rizika materiálu. Materiály s vyšší hodnotou HRR budou mít tedy negativní dopad na rozvoj požáru [48, 49, 50].

Při hoření textilních vláken dochází k jejich fyzikálním i chemickým změnám. Přejídné teploty textilních vláken jsou rovněž důležitými faktory pro hodnocení jejich odolnosti vůči požáru. Fyzikální změny nastávají při dosažení teploty skelného přechodu  $T_g$  a teploty tání  $T_m$ . Změny chemické pak nastávají při dosažení teploty rozkladu  $T_p$ , při které vznikají hořlavé plyny vlivem pyrolýzy vláken. Další přejídnou teplotou pro textilní vlákna je teplota vzplanutí  $T_c$  [48].

**Tabulka 3 - Hodnoty přejídných teplot pro vybraná textilní vlákna [48]**

Vlákno	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_p$ [°C]	$T_c$ [°C]
Vlna	-	-	245	600
Bavlna	-	-	350	350
Viskóza	-	-	350	420
Nylon 6	50	215	431	450
Nylon 66	50	265	403	530
Polyester	80 - 90	255	420 - 477	480
Akryl	100	>220	290	>250
Polypropylen	-20	165	469	550
Modakryl	<80	>240	273	690
Polyvinylchlorid (PVC)	<80	>180	180	450

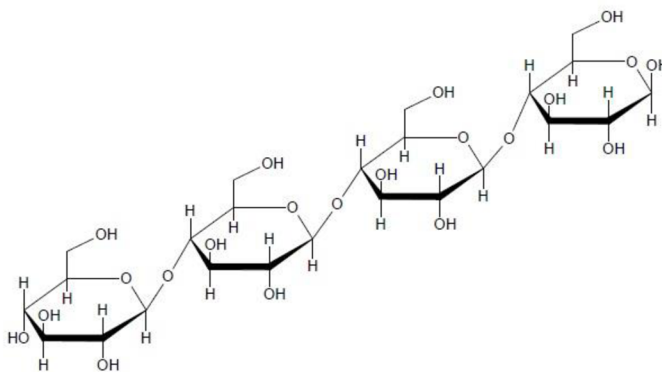
Problém hořlavosti recyklovaných textilních vláken a výrobků z nich ale není jen o hořlavosti samotných vláken, ale taky o dalších látkách, které se mohou v takové směsi recyklovaných textilních vláken nacházet. Textil, který je na recyklaci určen, je sice před samotným rozvlákněním zbaven netextilních částí, např. zipů a knoflíků, ale povrchové úpravy a jiné ošetření látky, např. zátěry, membrány a potisky, nelze vždy z textilií úplně odstranit [36]. Membrány, které se v textilu vyskytují, mají zajistit voděodolnost a odolnost vůči větru. Jsou většinou polyuretanové a někdy mohou být i teflonové a polyesterové. Membrány jsou jednou z vrstev vícevrstvé textilie a uplatňují se především v outdoorovém oblečení. Zátěry plní podobnou funkci jako membrána, ale mohou být aplikovány pouze na švy látek, aby zlepšily jejich nepromokavost a odolnost. Nejčastěji se jedná o polyuretan (PUR), polyvinylchlorid (PVC) a latex, protože kromě odolnosti



vůči vodě a větru mají i velice dobrou adhezi k textiliím. PUR a PVC z hlediska hořlavosti nepředstavují takový problém, ale latex (přírodní guma) má teplotu vznícení 191 °C. Z tabulky 3 vyplývá, že zbytky latexových zátěrů v recyklovaných textilních vláknech značně sníží odolnost vůči ohni výrobků z takovéto směsi vláken [51, 52, 53].

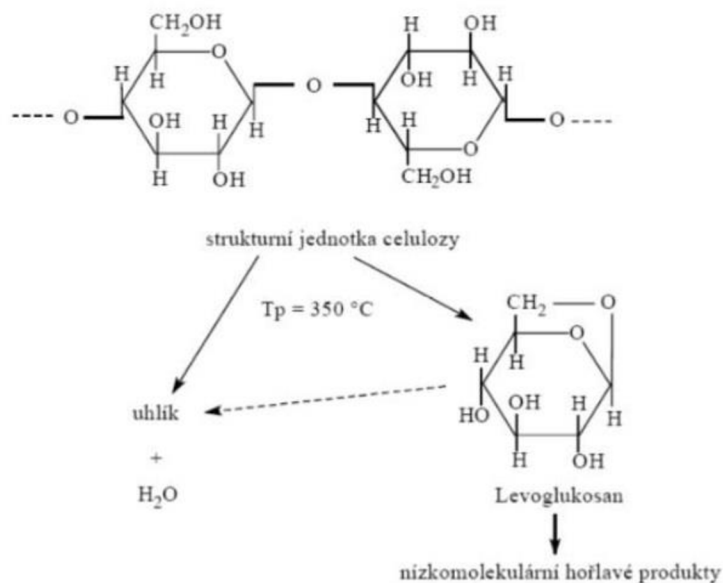
### 5.1 Rozklad celulózy a polyesteru vlivem zvýšené teploty

Celulóza je organický materiál vyskytující se především v bavlně, ale je obsažen i v některých vláknech ze syntetických polymerů. Organické materiály jsou nejhořlavější složkou v tepelných izolacích [54].

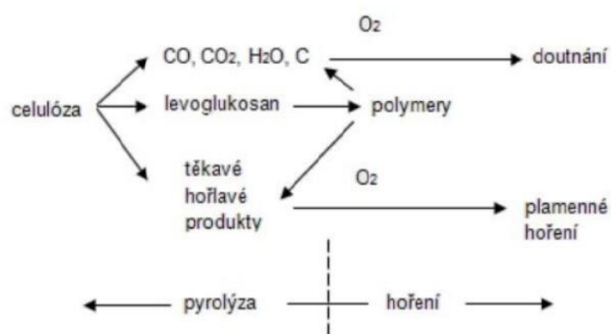


Obrázek 5 - Schéma strukturního vzorce celulózy [55]

Rozklad celulózy nastává okolo 350 °C, a jelikož bavlněná vlákna mají obsah až 96 % celulózy, mají teplotu rozkladu stejnou. Rozklad celulózy doprovází nezvratné změny, při kterých vznikají hořlavé těkavé látky (alkoholy, aldehydy), které se díky přítomnosti kyslíku během jejich spalování oxidují na oxid uhličitý a páru. Dále mohou vznikat i hořlavé plyny (oxid uhelnatý, metan) [54].

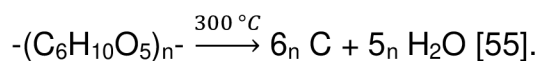


Obrázek 6 - Schéma 1 tepelného rozkladu celulózy [55]



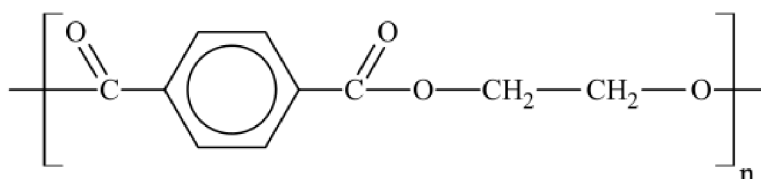
Obrázek 7 - Schéma 2 tepelného rozkladu celulózy [55]

Retardace hoření u celulóзовých vláken se nejčastěji využívá principu změny pyrolýzy. Při pyrolýze celulózy pak dochází k zuhelnatění, tedy zvýšení produkce uhlíku. Celulóza se zcela dehydratuje za vzniku uhlíku a vody, tak jak popisuje následující reakce:



Halogenidy dosahovaly na celulóзовých vláknách vysoké účinnosti, protože zamezovaly hoření reakcí v plamenu za vzniku radikálů. Jejich kombinace s celulózou byla ale zakázána, jelikož docházelo ke vzniku toxických a žíravých látek při jejich tepelném rozkladu [54, 56].

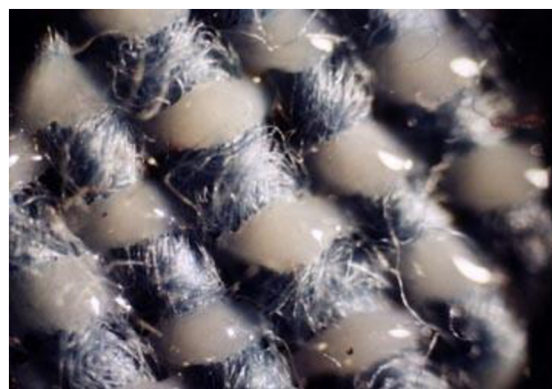
Jak již bylo zmíněno, polyesterová vlákna jsou konkrétně polyethyltereftalát. Na rozdíl od bavlny se jedná o termoplastický materiál, který se před samotným rozkladem a vzplanutím nejdříve roztaví. Teplota tání polyesterových vláken je 255 °C. Rozdílný proces tepelného rozkladu bavlny a polyesteru by mohl přispívat k větší hořlavosti jejich směsi, která byla definována hodnotou LOI v předchozí podkapitole. Dalším problémem způsobeným rozdílností hoření těchto materiálů je použití vhodného retardantu hoření, protože většina retardantů se liší svou účinností při použití na přírodních a umělých vláknech.



Obrázek 8 - Strukturní vzorec PET [57]



Obrázek 9 - Tkanina z polyesteru a bavlny před působením vyšší teploty, bílá - PES, modrá – bavlna [58]



Obrázek 10 - Tkanina z polyesteru a bavlny po působení vyšší teploty, bílá - PES, modrá – bavlna [58]

Pyrolýza polyesterových vláken nastává v rozmezí teplot 420 °C a 477 °C. Rozklad polyesteru vlivem tepla začíná náhodným rozpadem esterových vazeb a pyrolýzou produkovaných jednoduchých esterů. Při pyrolýze polyesterů vzniká acetaldehyd, voda, oxid uhličitý a oxid uhelnatý [59].

## 5.2 Retardanty hoření

Reakce na oheň izolací z recyklovaných textilních vláken je pravděpodobně největším problémem tohoto tématu. Je tedy vysoce pravděpodobné, že technologicky a funkčně vhodné ošetření recyklovaných textilních vláken

retardanty bude nedílnou součástí výrobního procesu těchto izolací. Retardanty hoření jsou látky, které zlepšují tepelnou odolnost materiálu, protože zpomalují a zabraňují hoření. K jejich používání došlo v době, kdy polymery začaly nahrazovat jiné přírodní materiály. Polymery se relativně jednoduše vyrábí, jsou v mnoha případech levné a značně přispívají ke zjednodušení a zlepšení života, ale při jejich spalování dochází k jejich rozkladu za vzniku jedovatých plynů. Tam, kde byla žádoucí nehořlavost materiálu, se tedy začaly používat retardanty hoření a v polovině minulého století, zároveň s rozšířením polymerů, se zvýšila jejich produkce. Jelikož od vývoje těchto látek neuplynula tak dlouhá doba, nebyl ještě dostatečně prozkoumán jejich životní cyklus a tak není jasné, jaký vliv mají na životní prostředí. Zatím se přestala používat bromované retardanty hoření, protože se zjistilo, že se jedná o látky perzistentní, které se akumulují v životním prostředí [60].

Způsob fungování retardantů může být založen na **fyzikálním** nebo **chemickém principu**, většinou se však jedná o kombinaci obou těchto způsobů. Může tedy dojít k **uhašení nebo zpomalení šíření plamene vlivem endotermní chemické reakce**, nebo se může jednat o **změnu procesu pyrolýzy**, kdy se snižuje množství hořlavé látky a zvyšuje se tvorba látky méně hořlavé, která působí jako ochranná vrstva zbývajícího materiálu. Retardanty mohou začít působit již v průběhu pyrolýzy (před vznícením) tak, že změní její proces, nebo **snížují hořlavost látky reakcí v plamenu**, nebo zamezují přístupu kyslíku a tepla k ohnisku hoření [60].

Retardanty, které **mění proces pyrolýzy**, mohou být zakomponovány do struktury materiálu a působí tak proti štěpení organických sloučenin, které v procesu pyrolýzy nastávají. Tím pádem omezují vznik hořlavých látek a zvyšují termickou stabilitu materiálu. Retardanty fungující na tomto principu jsou na bázi fosforu. Kyselina fosforečná, která se z nich za tepla uvolňuje, vytváří sklovitou ochrannou vrstvu, přes kterou se k materiálu nedostane kyslík a z materiálu tak vzniká spíše popel než těkavé plyny. Pro použití na textil by mohl být vhodný červený fosfor, který je účinný v materiálech s obsahem kyslíku a dusíku, tj. polyestery a polyamidy, které se v textilu běžně vyskytují. Dalším používaným retardantem

na bázi fosforu pro textil je tris(2-chlorethyl)fosfát. U fosfátových retardérů hoření ale nebyla prokázána jejich neškodlivost vůči zdraví a životnímu prostředí [60].

Volné radikály, které vznikají při hoření materiálu, podporují proces hoření, protože atmosférický kyslík při hoření reaguje s volným radikálem vodíku, který se odštěpuje z paliva. Dochází tak ke vzniku velmi reaktivního hydroxylového radikálu. Mohou tomu zamezit bromované retardanty, ze kterých se při hoření uvolňují volné radikály bromidu, které **reagují s volnými radikály v plamenu** a nedochází tak k reakci se vzdušným kyslíkem. Takto nevznikají těkavé produkty, polymer se spéká a tento proces zpomaluje hoření. Bromované retardanty patří do skupiny halogenovaných retardantů a z této skupiny by byl na textil vhodný retardant s označením deca-BDE, konkrétně dekabromdifenyl ether, ale jak již bylo zmíněno, od používání těchto retardantů se upustilo [60].

Další možností, jak zpomalit hoření, je omezení přístupu kyslíku a snížení teploty, a toho je možné docílit několika způsoby. Zpomalovače hoření mohou tvořit uhlíkový popel ve vrstvě na povrchu polymeru, to omezí přístup vzduchu a navíc je uhlík málo hořlavý, a tak polymer chrání před plamenem. Některé zpomalovače mohou pod ochranným povlakem uhlíkového popela i nabobtnat, takže dojde k vytvoření tepelně izolační vrstvy a k materiálu se teplo nedostane tak rychle. Další možnou variantou je, že při hoření retardantu dojde i k **endotermní reakci**. K tomu dochází v případě hydroxidu hlinitého, který při zahřívání uvolňuje vodní páru, která ochlazuje materiál. Oxid hlinitý, který je dalším produktem této reakce, pak zároveň působí jako ochranná vrstva. Další látkou, která docílí stejného efektu, je hydroxid hořečnatý. Tyto látky patří do skupiny anorganických retardantů hoření. Hydroxidy kovů a alkalických zemin mají výhodu, že jsou levné a netoxické, ale velkou nevýhodou je jejich malá účinnost. Kvůli nízké účinnosti se často kombinují s jinými typy zpomalovačů, a to např. s boritanem zinečnatým [60].

### **Způsob aplikace retardantů hoření**

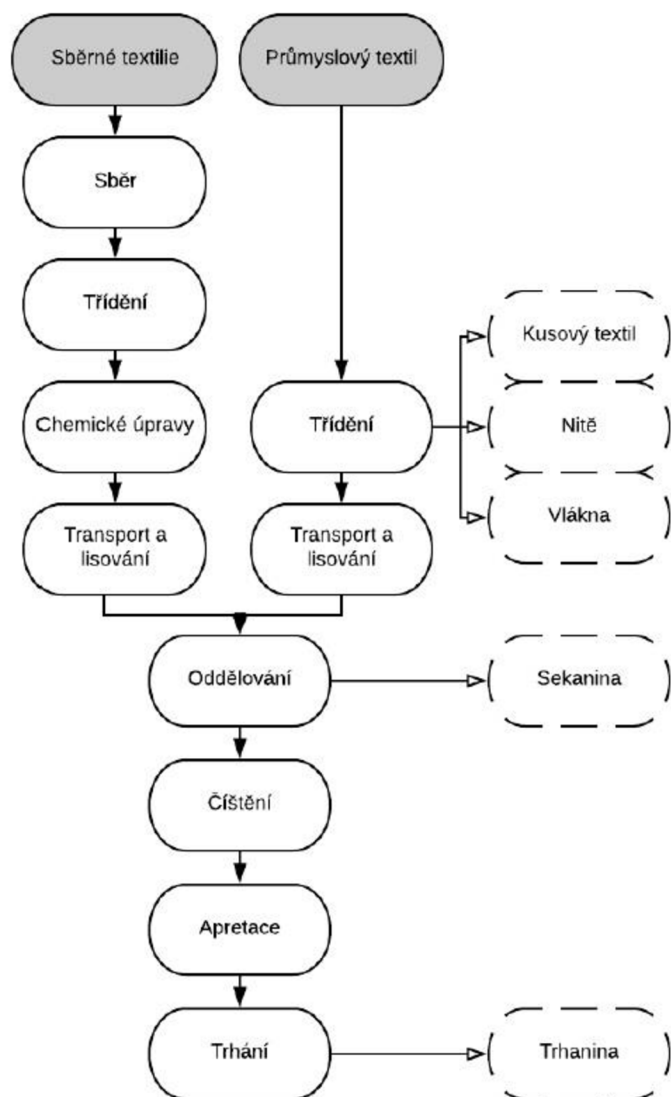
Retardanty hoření je možné rozdělit na trvanlivé a netrvanlivé, které vlivem vlhkosti ztrácí účinek, a proto se jich využívá jen na místech, kde s vlhkostí nepřijdou do kontaktu. Jejich trvanlivost se dá prodloužit impregnací proti vlhkosti.

Retardanty hoření jsou látky, které mohou být tekuté nebo v podobě prášku, který je rozpustný ve vodě. Existují tři možnosti aplikace těchto látek, a to namáčením materiálu v roztoku retardantu hoření, nástřikem roztoku retardantu hoření na materiál a roztíráním pěny retardantu hoření na materiál [54, 60, 61].

Namáčení materiálu v roztoku přípravku je účinné, ale nejvíc energeticky náročné, jelikož je potřeba materiál po namočení vysušit. Pro tuto aplikaci je taky nutné obrovské množství vody a přípravku, a navíc není možné přesně stanovit opravdové množství přípravku v materiálu. Energeticky, časově a na spotřebu vody a přípravku méně náročnější variantou než namáčení je postřik už hotové rohože anebo vlákenného materiálu. Kromě šetření zdrojů má tento způsob aplikace výhodu v tom, že je možné přesně určit koncentraci přípravku v materiálu. Poslední variantou je aplikace pasty nebo pěny na povrch izolantu. Izolant je posouván pásovými dopravníky směrem k místu aplikace, kde je pěna na materiál nanášena a uhlazována nožem nebo stěrkou, aby byla zajištěna konstantní výška pěny [54, 60, 61].

## **6. Recyklace textilních odpadů**

Recyklace textilního odpadu je komplikovaným procesem, ke kterému je možné přistupovat z několika stran. Ideálním případem, jak s textilním odpadem nakládat, je předcházet jeho vzniku, a to zlepšením technologie výroby, vyrobením produktu, který lze snadněji recyklovat, a snížením vlastní spotřeby. Úplně zabránit vzniku odpadů není v dohledné budoucnosti možné, a tak následuje materiálová recyklace, při které jsou odpady zpracovány do stejného nebo odlišného typu výrobku. Další možností je recyklace surovinová, která zahrnuje biotechnologické postupy, jako kompostování a řízené skládkování, a termické postupy, kam patří spalování a pyrolýza. Pyrolýza je vhodná pro polymery, protože tyto látky je možné takto zpětně rozložit na monomery a získat tak energeticky využitelný plyn nebo topný olej [29].



**Obrázek 11 - Schéma získávání trhaniny ze sběrového odpadního textilu a z průmyslového odpadního textilu [62]**

Materiálová recyklace rozlišuje textilní odpady na vratné a nevratné. Vratné, tzv. čisté odpady, pochází z průmyslové výroby a ještě jim nebyla vlivem výrobního procesu změněna fyzikální a chemická struktura, a tak je možné je začlenit do některého z kroků výrobního procesu. Odpady nevratné jsou výrobky, které již získaly vlivem výrobního procesu jiné fyzikální a chemické vlastnosti. Nevýhodou materiálové recyklace textilního odpadu je, že vlivem mechanického a termického působení dochází ke zhoršení vlastností recyklovaného výrobku. V případě textilních vláken dochází nevyhnutelně v jednom z kroků recyklace k jejich trhání, a tak mohou ztratit svou pevnost. Dalším problémem recyklovaných textilních vláken je kolísání jejich vlastností vlivem nesterodného původu vláken

v textilním odpadu [29, 63]. Z hlediska zaměření této diplomové práce budou v následujících odstavcích podrobněji popsány kroky materiálové recyklace textilního odpadu, jehož původ je ze sběrných kontejnerů určených na textil, který již splnil svou primární funkci.



Obrázek 12 - Odpadní textil [64]



Obrázek 13 - Příklad sběrného kontejneru na textil [65]

## 6.1 Třídění textilních odpadů

Tříděním textilních odpadů se zabývají provozovatelé kontejnerů a společnosti zabývající se obchodem s použitým textilem. Textilie, které skončily v kontejneru, jsou nejčastěji ručně tříděny školenými pracovníky podle toho, jestli mohou i nadále plnit svou primární funkci. Pokud je oblečení zachovalé a v dobrém stavu, je darováno potřebným – charitám anebo zemím třetího světa. Oblečení, které již nejde znovu použít je tříděno podle materiálu, jsou z něj odstraněny netextilní části



a po dalších krocích recyklace zpracováno na jiné výrobky, nejčastěji tou samou společností, která sběrný kontejner provozuje. Pokud sběrný kontejner charitativní společnost přímo provozuje, předá vytrízené oblečení firmám, které se zabývají další recyklací textilu. S použitým textilem je možné i obchodovat, a to je většinou záležitost second handů, které skupují takový textil např. z Velké Británie, kde bývá sběrový textil vyšší kvality a je v ČR dále prodejný. Takovéto zboží je vytríženo ručně pracovníky second handu, neprodejný zbytek textilu na další užívání pak dále skupují společnosti, které se zabývají jeho dalším zpracováním [29, 36, 66].

Jak již bylo zmíněno, třídění probíhá nejčastěji ručně a je nejsložitějším a finančně nejnáročnějším procesem, protože zahrnuje lidskou práci. Je taky nejméně dokonalým procesem a představuje tak prostor pro zlepšení. Kolísání vlastností materiálu je ve většině případů způsobeno jeho nesterodností. Jelikož textil není ve většině případů tvořen jedním typem textilních vláken, ale skládá se z jejich kombinací, je jasné, proč je třídění nejsložitějším procesem recyklace textilu, a proč by bylo přínosné se snažit o zvýšení jeho efektivity. [36] Nabízí se zde myšlenka automatizovaného třídění, které by mohla být dosaženo pomocí infračervené spektrometrie, Raman spektrometrie a NIR technologie (z anglického near infrared). Tyto metody by mohly být pro třídění textilu nejvhodnější [31].

Nejčastější kombinací vláken je polyester a bavlna. Jedna z možností třídění této směsi je chemickou cestou, která je založena na principu rozpuštění jedné nebo druhé složky v rozpouštědlech. Tato metoda je ale velmi náročná a drahá [31].

## **6.2 Čištění**

Čištění odpadního textilu je důležitým krokem, protože jeho znečištění může značně ovlivnit jeho další vlastnosti, např. soudržnost s dalšími vlákny. Sběrový textil obsahuje řadu volných i chemicky vázaných nečistot. Mezi volné nečistoty patří prach, písek apod., mezi vázané patří mýdla, zbytky impregnací atd. Textilní odpady se mohou čistit mechanicky a praním, ale v případě sběrového textilu se volí praní. Praní odstraní vázané i nevázané nečistoty, je ale náročné na spotřebu

vody, a tím pádem i finančně. Prací linka je složena z pracích, ždímacích, oplachovacích a sušících strojů spojených pásovými dopravníky [4].

### **6.3 Sekání**

Účelem sekání je ze sběrového textilu vytvořit menší kusy, aby následné rozvlákňování bylo jednodušší. V případě sběrového textilu se jedná o velké kusy látek, a tak jsou v tomto procesu řazeny za sebe dva sekací stroje, které jsou orientovány kolmo na svůj směr sekání. V případě, že by se jednalo o nitový odpad z průmyslové výroby, stačil by pro tento účel jeden sekací stroj, jehož orientace by bylo kolmá k délce nití. Pro sběrový textil jsou vhodné dva typy sekání, a to rotační a gilotinové. Linka s rotačním sekáním se skládá z pásových dopravníků, které zajišťují transport textilu, a jednoho stacionárního nože a jednoho rotačního nože. Materiál je dopravován pásovým dopravníkem na hranu stacionárního nože, proti které rotuje nůž rotační. Menší výkon má sekání gilotinové, které využívá principu padajícího nože do podložky anebo je podložka nahrazena protinožem [36].

### **6.4 Trhání a rozvlákňování**

Před anebo po trhání a rozvlákňování může být do procesu recyklace zařazen krok nazývaný apretace. Pojem apretace v kontextu zpracování odpadního textilu označuje krok, kdy jsou vlákna nebo nasekané kusy textilií ošetřeny emulzí olejů, aby nedošlo při jejich tření o stroje nebo o sebe navzájem ke vzniku elektrostatického náboje a následnému vzplanutí materiálu, protože při provozu strojů navíc vzniká teplo. Některá textilní vlákna, např. nylon, jsou na vznik elektrostatického náboje náchylnější [42]. Účelem trhání a rozvlákňování je získání víceméně ojedinělých vláken, která mohou být vhodnou druhotnou surovinou pro výrobu netkaných textilií. Nasekané kusy sběrového textilu jsou pásovými dopravníky dopravovány k podávacím válečkům, které rotují v opačném směru k trhacímu bubnu. Trhací buben je opatřen zahnutými kovovými trny a vzájemnou rotací bubnu a podávacích válečků dojde k vytrhání vláken. Účinnost trhacích strojů je malá, proto jich je řazeno na lince vždy více za sebou. Na konci linky mohou být větší chomáče vláken znovu pneumaticky dopravovány na začátek procesu. Tato vlákna se označují jako trhanina [36].



Obrázek 14 - Trhací linka [67]



Obrázek 15 - Trhanina



Obrázek 16 - Trhanina pod mikroskopem, zvětšeno 30 x

Z obrázků je patrné, že v trhanině se nachází ještě svazky nití a chomáče vláken. Účinnějšího rozvláknění není dostupnými technologiemi možné docílit. Tato trhanina byla dodána firmou Retex a.s. pro účely bakalářské práce, na kterou tato diplomová práce navazuje.

### **III. Praktická část**

#### **7. Cíl práce**

Cílem této práce je především ověřit možnosti využití odpadních textilních vláken získávaných ze sběrového textilu a vývoj izolačních rohoží zhotovených z této druhotné suroviny, které by měly srovnatelné vlastnosti s již dostupnými izolacemi na trhu. V rámci práce by měla být provedena úprava reakce na oheň těchto izolantů, jelikož tato vlastnost zatím představuje ve vývoji tohoto materiálu největší problém. Úprava této vlastnosti izolací by měla proběhnout tak, aby bylo možné je aplikovat ve stavebních konstrukcích v oblasti občanské výstavby. Dále by měl být proveden návrh úprav prototypu izolantu a měly by na něm být stanoveny klíčové vlastnosti a účinné zlepšení reakce na oheň. V závěru by mělo následovat posouzení použitelnosti výsledků a srovnání vlastností modifikovaného prototypu izolantu s již dostupnými izolacemi na trhu.

#### **8. Metodika práce**

Na základě literární rešerše a dostupných informací byl navržen izolant z recyklovaných textilních vláken nižší kvality ze sběrového textilu. V případě této suroviny se jedná o odpadní textil, který by skončil ve spalovnách nebo na skládce. Tento materiál byl zvolen nejen kvůli své nízké ceně a potřebnosti jeho recyklace, ale taky proto, že představuje potenciálně zajímavý zdroj druhotné suroviny z hlediska možného využití pro výrobu tepelných a akustických izolací s dobrými užitnými vlastnostmi. Dále pak lze předpokládat, že s nadcházející povinností třídít textilní odpad, se zlepší jeho dostupnost. Použité izolanty v rámci diplomové práce byly vyrobeny ve spolupráci s firmou Retex a.s. metodou Air-lay, která je založena na principu termického pojení vláknenných rohoží.

Největším problémem v oblasti vývoje tepelných a akustických izolací z recyklovaného textilu představuje především reakce na oheň, a proto bylo vybráno 8 druhů retardérů hoření pro ošetření vzorků a byla prakticky ověřena jejich účinnost. Retardéry hoření byly na vzorky aplikovány v různém množství, aby bylo možné posoudit optimální množství účinného retardéru hoření. Některé

retardéry bylo třeba ředit s destilovanou vodou dle pokynů výrobce. Byly zvoleny tyto retardanty hoření:

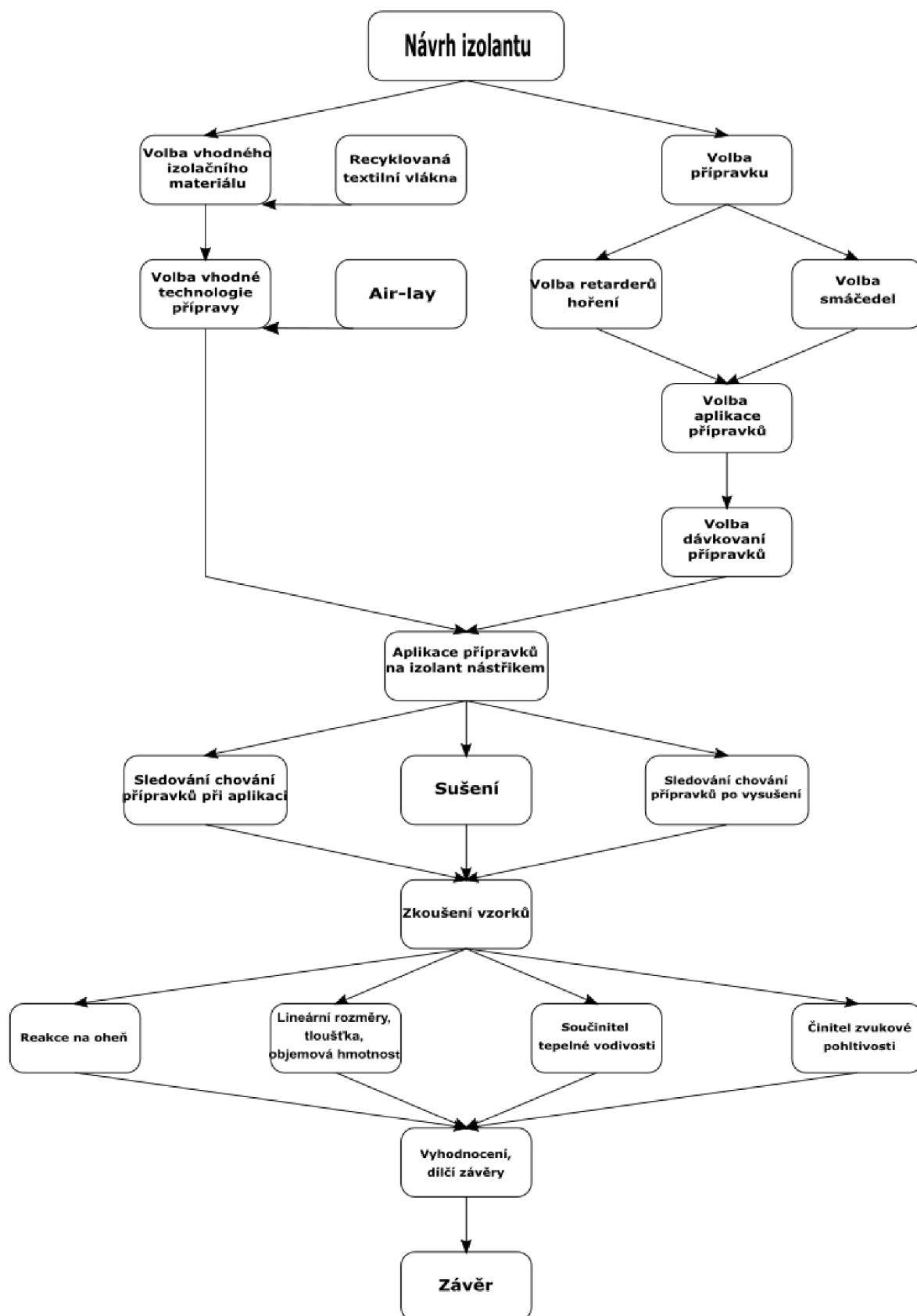
- **tetraboritan sodný dekahydrát (borax),**
- **uhličitan sodný,**
- **dihydrogenfosforečnan amonný,**
- **síran hlinitý,**
- **Retacell** od firmy Movychem – na bázi fosforečnanů (směs amoniumpolyfosfátu a pentaerytritu,
- **Texaflam CU** od firmy Inotex – na bázi komplexních alkylfosfonátů bezhalogenových,
- **Stopfire** od firmy Divadelní služby určený k impregnaci textilu,
- **FR CROS 584** od firmy Brenntag na bázi polyfosforečnanu amonného.

Retardéry hoření byly na vzorky aplikovány nástřikem. V bakalářské práci, na kterou tato diplomová práce navazuje, byla vlákna ošetřena ponořením do roztoku retardérů hoření, ale došlo se k závěru, že tento postup je náročný technologicky, na spotřebu vody, na spotřebu energie při sušení vláken i časově. Kvůli této náročnosti by velmi pravděpodobně vzrostla neúměrně i cena výrobku. Aplikace retardérů hoření nástřikem na izolant je z hlediska technologie jednodušším řešením. Rovněž bylo posouzeno, jak se retardanty hoření chovají při aplikaci na izolant a po jejich zaschnutí.

Dále byly na vzorcích upravených izolantů zjištěny tyto klíčové vlastnosti:

- **lineární rozměry,**
- **tloušťka,**
- **objemová hmotnost,**
- **reakce na oheň,**
- **zvuková pohltivost,**
- **součinitel tepelné vodivosti.**

Všechny zkoušky byly rovněž provedeny na sadě referenčních vzorků bez úprav. Provedením těchto zkoušek byl rovněž ověřen vliv použití retardéru hoření na tyto vlastnosti.



Obrázek 17 - Schéma metodiky praktické části práce

## 9. Zkušební vzorky

V následující kapitole je popsán použitý tepelně izolační materiál, zvolené retardanty hoření pro jeho modifikaci, způsob zhotovení izolantu a způsob aplikace retardérů hoření.

### 9.1 Izolační materiál

Jako izolační materiál byl pro praktickou část této práce zvolen izolant z recyklovaných textilních vláken druhotné kvality. Původ těchto vláken je v odpadním sběrovém textilu, který prošel způsobem recyklace, který je podrobněji popsán v kapitole č. 6. Do trhaniny byla přidána bikomponentní vlákna z co-polyesteru, která po natavení horkým vzduchem zajistila soudržnost s recyklovanými textilními vlákny, jejich obsah činil 20 %. Prototyp izolantu byl zhotoven metodou Air-lay, která je podrobněji popsána v bakalářské práci Vývoj izolačních materiálů z druhotných textilních vláken, na kterou tato diplomová práce navazuje. Izolační rohož měla výrobní objemovou hmotnost  $32 \text{ kg/m}^3$  a tloušťku 100 mm. Vzorky byly dodány výrobcem firmou Retex a.s. ve formě desek o rozměrech 1200 mm × 600 mm.



**Obrázek 18 - Izolační rohož, 80 % recyklovaná textilní vlákna, 20 % bikomponentní vlákna, zhotovená metodou Air-lay ve firmě Retex a.s.**

## 9.2 Zvolené retardanty hoření

Na úpravu pro snížení hořlavosti (zlepšení reakce na oheň) izolační rohože (viz. obrázek 18) byly zvoleny následující přípravky:

- **Tetraboritan sodný dekahydrát (borax)**

Tato látka se vyskytuje i v přírodě jako minerál. Je to anorganická sloučenina, která se prodává ve formě bílého prášku rozpustného ve vodě [55]. Používá se jako retardér hoření dřeva [68].

- **Uhličitan sodný**

Je známý pod názvem soda, což je bílý prášek rozpustný ve vodě. Má využití při výrobě skla a papíru [55].

- **Dihydrogenfosforečnan amonný**

Je to bílá krystalická látka, která se využívá jako hnojivo nebo aditivum [55].

- **Síran hlinitý**

Je to bílá krystalická sloučenina používaná pro čištění pitné vody [55].

- **Retacell**

Je to směs amonumpolyfosfátu a pentaerytritu, který se využívá jako protipožární impregnace vláknitých izolantů.

- **Texaflam CU**

Je to amino tris(methylenfosfonová kyselina) a amonná sůl ve formě průhledné kapaliny. Používá se jako retardér hoření textilu.

- **Stopfire**

Jedná se o chlorid amonný, používá se na protipožární ochranu celulósových vláken [69].

- **FR CROS 584**

Jedná se o polyfosforečnan amonný. Je to bílý prášek rozpustný ve vodě používán jako protipožární nátěr [70].

Pro zlepšení penetrace přípravků byla vybrána tato smáčedla od firmy Inotex:

- **Nofome AF**

Jedná se o polyglykoether mastného alkoholu a 2-ethylhexan-1-ol.

- **Texamerc MN**

Je to 2-ethylhexyl sulfát sodný a 2-(2 butofyethoxy) etanol.



### 9.3 Příprava vzorků

Izolační rohož byla nařezána nožem na izolace s vlnitým ostřím na 4 části o rozměrech 300 mm × 600 mm. Rozdělení na tyto části lze vidět na obrázku 18. Každá z těchto částí byla ošetřena jiným přípravkem a jiným dávkováním přípravku.

#### Aplikace retardérů hoření

Vzorky, které v této fázi měly plošné rozměry 300 mm × 600 mm, byly ošetřeny retardérem hoření. Retardéry hoření byly aplikovány nástřikem ručním postřikovačem s nastavitelnou tryskou z obou stran vzorku. Dávkování přípravků se stanovilo jako množství roztoku přípravku na plochu vzorku v g/m<sup>2</sup>. Množství aplikovaného retardéru hoření se odvíjelo od dávky 3 % z hmotnosti izolantu a na základě účinnosti této koncentrace byly aplikovány i další. U práškových retardérů hoření se roztoky s účinnou látkou namíchaly s destilovanou vodou v takové koncentraci, jaká je rozpustnost dané látky při teplotě 20 °C ve vodě. Množství naneseného roztoku se stanovilo gravimetricky jeho přívazkem na vzorku. Při aplikaci retardéru hoření Texaflamu CU bylo na 4 sady vzorků použito v roztoku i smáčedlo, které by mělo zajistit větší penetraci přípravku do struktury izolantů.

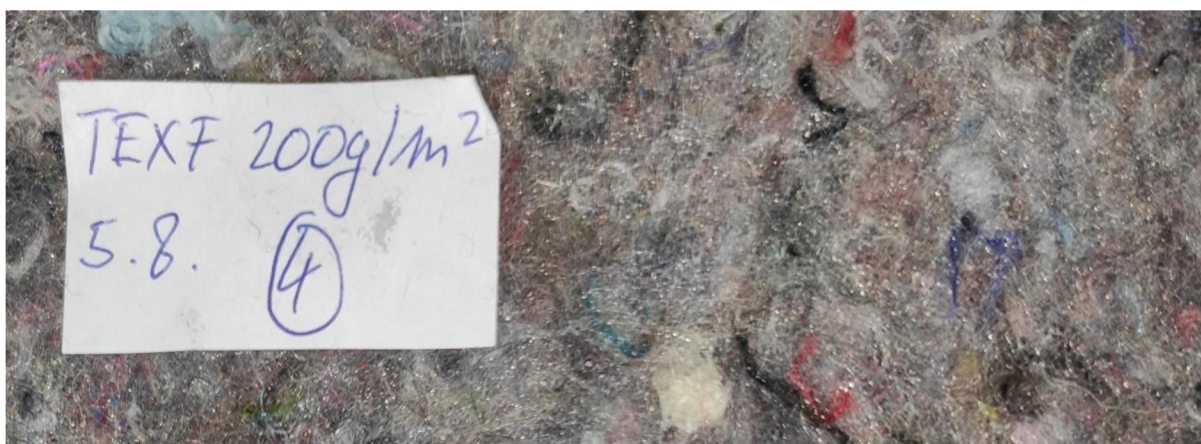


Obrázek 19 – Ruční postřikovač na aplikaci přípravků

Tabulka 4 – Aplikované dávky retardéru hoření Texaflam CU

Přípravek	Dávkování roztoku [g/m <sup>2</sup> ]	Poměr ředění s destilovanou vodou	Množství aplikovaného roztoku na plochu vzorku 0,18 m <sup>2</sup> [g]	Množství aplikované účinné látky [g/m <sup>2</sup> ]
Texaflam CU	35	-	6,3	35
	50	-	9,0	50
	70	-	12,6	70
	100	-	18,0	100
	150	-	27,0	150
	200	-	36,0	200
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100	-	18,0	100
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100	1:1	18,0	50
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100	1:3	18,0	25
Texaflam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l	100	-	18,0	100

**Texaflam CU** při aplikaci postřikovačem vytvářel větší kapky, i když tryska na postřikovači byla nastavena na jemnou mlhu, jinak samotná aplikace byla bez problémů. Tento přípravek od dávky 70 g/m<sup>2</sup> na vzorku ani za týden zcela nezaschl a na povrchu byly viditelné kapky, na dotek byl pak vzorek lepivý a mazlavý. Manipulace se vzorkem po této úpravě nebyla jednoduchá a při řezání rohože došlo k setření části přípravku.

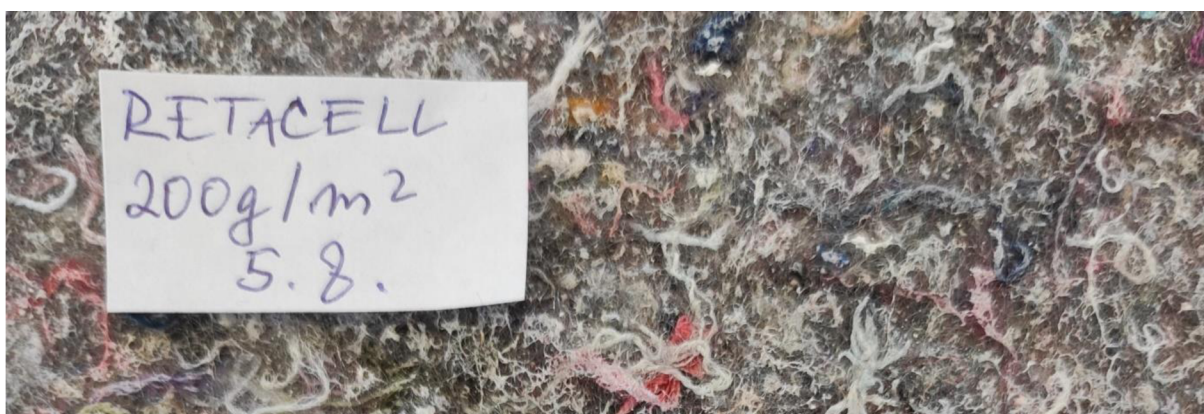


Obrázek 20 - Povrch vzorku ošetřen Texaflamem CU, dávka 200 g/m<sup>2</sup>, týden po aplikaci, viditelné kapky

Tabulka 5 – Aplikované dávky retardéru hoření Retacell

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Množství aplikovaného roztoku na plochu vzorku 0,18 m <sup>2</sup> [g]	Množství aplikované účinné látky [g/m <sup>2</sup> ]
Retacell	35	6,3	35
	70	12,6	70
	100	18,0	100
	150	27,0	150
	200	36,0	200

Aplikace přípravku **Retacell** byla jednoduchá, tvořil jemné kapky a neucpával trysku. Po jeho zaschnutí na povrchu vytvořil bílou krustu a povrch tak byl tvrdší. Při manipulaci se vzorkem se nedrolil.



Obrázek 21 - Povrch vzorku ošetřen Retacellem, dávka 200 g/m<sup>2</sup>, týden po aplikaci, viditelná bílá krusta

Tabulka 6 - Aplikované dávky retardéru hoření FR CROS 584

Přípravek	Dávkování roztoku [g/m <sup>2</sup> ]	Rozpustnost ve vodě při 20 °C [g/100ml]	Množství aplikovaného roztoku na plochu vzorku 0,18 m <sup>2</sup> [g]	Množství aplikované účinné látky [g/m <sup>2</sup> ]
FR CROS 584	100	0,50	18,0	0,50
	150		27,0	0,75

**FR CROS 584** má malou rozpustnost a aplikace nebyla jiná než aplikace destilované vody. Neucpával trysku a po zaschnutí na povrchu nebyl zřetelný a nebyl poznat ani na omak.

Tabulka 7 – Aplikované dávky retardéru hoření Stopfire (báze chloridu amonného)

Přípravek	Dávkování roztoku [g/m <sup>2</sup> ]	Poměr ředění s destilovanou vodou	Množství aplikovaného roztoku na plochu vzorku 0,18 m <sup>2</sup> [g]	Množství aplikované účinné látky [g/m <sup>2</sup> ]
Stopfire (chlorid amonný)	150	1:1	27,0	13,5
	200		36,0	18,0
	250		45,0	22,5

**Chlorid amonný** při aplikaci nevykazoval žádné komplikace, tvořil jemnou mlhu. Po zaschnutí nebyl na povrchu vidět, ale povrch vzorku byl na omak slepenější a tvrdší.

Tabulka 8 - Aplikované dávky retardérů hoření (solí)

Přípravek	Dávkování roztoku [g/m <sup>2</sup> ]	Rozpustnost solí ve vodě při 20 °C [g/100ml]	Množství aplikovaného roztoku na plochu vzorku 0,18 m <sup>2</sup> [g]	Množství aplikované účinné látky [g/m <sup>2</sup> ]
Borax	100	2,50	18,0	2,44
	150		27,0	3,66
Uhličitan sodný	100	21,80	18,0	17,90
	150		27,0	26,85
Dihydrogen fosforečnan amonný	100	37,00	18,0	27,01
	150		27,0	40,52
Síran hlinitý	100	36,4	18,0	26,69
	150		27,0	40,52

Při aplikaci **solí** byl dost častým jevem ucpávání trysky, aplikace pak byla zdoluhavá. Rovnoměrnost nanášení tím pádem nebyla tak dobrá jako v předchozích případech, protože ucpáním trysky se tvořily větší kapky a spíše proud roztoku místo mlhy. Nástřík probíhal ručně, a tak bylo možné rovnoměrnost zajistit. V praxi při automatizovaném nanášení by bylo třeba tento problém vyřešit. Po zaschnutí se ošetření solemi projevilo jen na omak tvrdším povrchem. V daném případě byly voleny roztoky v co nejvyšších koncentracích, aby se omezilo množství vnesené vody do izolantu. Tyto koncentrace byly limitovány rozpustností dané soli ve vodě při teplotě 20 °C. Rozpustnost je vlastnost látky tvořit s rozpouštědlem homogenní směs, a tak bylo možné ve 100 ml vody

o teplotě 20 °C rozpustit jen určité množství soli. V tabulce 8 je uvedeno množství aplikované účinné látky (soli) v gramech na plochu 1 m<sup>2</sup>.

### **Sušení a řezání vzorků**

Ošetřené vzorky přípravky se nechaly vysušit týden v laboratorních podmínkách. Jsou postaveny na hranu, jelikož byly ošetřeny nástřikem z obou stran, viz. obrázek 22 níže.



**Obrázek 22 - Sušení vzorků v laboratorních podmínkách**

Takto vysušené vzorky byly dále upraveny na požadované rozměry prováděných zkoušek. Například pro zkoušku malým zdrojem plamene byly vzorky nařezány na rozměr 250 mm × 90 mm pomocí kuchyňského nože s vlnitým ostřím a dřevěného příložníku, aby nedošlo k přílišnému vytrhání vláken. Občasnému vytrhnutí vlákna anebo chomáče se bohužel nešlo vyhnout, ale zhotovení příložníků proces řezání zlepšilo.



Obrázek 23 - Vyznačení rozměrů vzorků na ošetřené izolaci



Obrázek 24 - Příložník s drážkou na nůž

## 10. Prováděné zkoušky

Prováděné zkoušky byly vybrány na základě cílů této diplomové práce. Jedná se zejména o ověření zlepšení reakce na oheň po použití retardérů hoření. Stanovení součinitele tepelné vodivosti a činitele zvukové pohltivosti byla provedena především z toho důvodu, aby se ověřilo, jestli mělo ošetření retardérem hoření na tyto zkoušené vlastnosti nějaký vliv. Dále byly na vzorcích izolantu změřeny lineární rozměry, tloušťka a objemová hmotnost.

Bylo provedeno stanovení reakce na oheň dle ČSN en 13501-1 [16], přičemž byla provedena zkouška zdrojem malého plamene v souladu s normou ČSN EN ISO 11925 – 2 [23], protože byl předpoklad, že se bude pohybovat reakce na oheň v rozmezí tříd E a F. Dále bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti v souladu s ČSN EN 12667 metodou dle ČSN 72 7012 – 3 a ISO 8301 [71]. Zvuková pohltivost pak byla stanovena v souladu s ČSN ISO 10534 – 1 [72]. Lineární rozměry byly stanoveny v souladu s normou ČSN EN 822 [73], pro stanovení tloušťky je to norma ČSN EN 823 [74] a pro objemovou hmotnost ČSN EN 1602 [75].

### **10.1 Stanovení lineárních rozměrů**

Lineární rozměry se stanovují dle ČSN EN 822: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení délky a šířky. Lineárními rozměry se označují délka a šířka, kdy délka  $l$  [m] je delším rozměrem hlavního povrchu zkušební tělesa a šířka  $b$  [m] je kratší rozměr hlavního povrchu zkušební tělesa. Před provedením zkoušky bylo zkušební tělo nutno ponechat v prostředí s teplotou vzduchu  $23 \pm 5$  °C po dobu minimálně 6 hodin. Zkušební těleso bylo umístěno na rovinný povrch a lineární rozměry zkušební byly odečteny z měřidla, které má milimetrové dělení a umožňuje odečítání hodnot s přesností na 0,5 mm [73].

### **10.2 Stanovení tloušťky**

Stanovení tloušťky respektuje normu ČSN EN 823: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky. Tloušťka  $t$  [m] je lineární rozměr tělesa, který je kolmý k jeho délce a šířce. Tloušťka tepelněizolačního materiálu byla změřena pod zatížením  $50 \pm 1$  Pa, které bylo zajištěno volně položenou přítlačnou deskou na zkušební těleso. Zkušební těleso bylo položeno na rovinném, tvrdém referenčním povrchu měřícího přístroje, který byl vybaven úchylkoměrem. Úchylkoměr musí mít přesnost 0,5 mm. Podstatou zkoušky bylo stanovit vzdálenost mezi referenčním povrchem a přítlačnou deskou. Tloušťka izolačního materiálu je střední hodnota měření provedených na všech bodech zkušební tělesa a je zaokrouhlená na nejbližší milimetr [74].

### 10.3 Stanovení objemové hmotnosti

Definice objemové hmotnosti je dle ČSN EN 1602 podíl hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu [75]. Zkušební těleso musí dosáhnout konstantní hmotnosti, a proto bylo kondicionováno při teplotě  $23\pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $50\pm 5$  %. Objem tělesa byl stanoven z lineárních rozměrů a tloušťky a hmotnost byla zvážena na laboratorních vahách. Objemová hmotnost byla vypočítána dle následujícího vztahu:

$$\rho_v = \frac{m}{V}$$

kde:  $\rho_v$  – objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  – hmotnost zkušebního tělesa [kg]

$V$  – objem zkušebního tělesa, stanovený z lineárních rozměrů a tloušťky [ $\text{m}^3$ ].

### 10.4 Stanovení reakce na oheň

Pro stanovení reakce na oheň materiálu byla provedena zkouška malým zdrojem plamene podle normy ČSN EN ISO 11925 – 2: Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene. V souladu s touto normou byl při zkoušení vzorků ponechán plamen působit na plochu i na hranu vzorku. Bylo tak učiněno především proto, že pokud plamen působí na plochu vzorku, je možné z toho vyvodit závěr o účinnosti použitého retardéru hoření, kdežto působení plamene na hranu ověří také, jestli použitý retardér hoření propenetroval do vzorku. Při zkoušení některých vzorků bylo i rozlišeno, jestli plamen působí na hranu neřezanou nebo řezanou. Nařezání rohože na vzorky o požadovaných rozměrech  $250 \times 90$  mm pro tuto zkoušku proběhlo až po jejich ošetření retardérem hoření a proto strana, která byla řezána, není ošetřena retardérem hoření, jelikož při aplikaci nástřikem se retardér hoření v malém množství dostal i na hranu rohože [23].

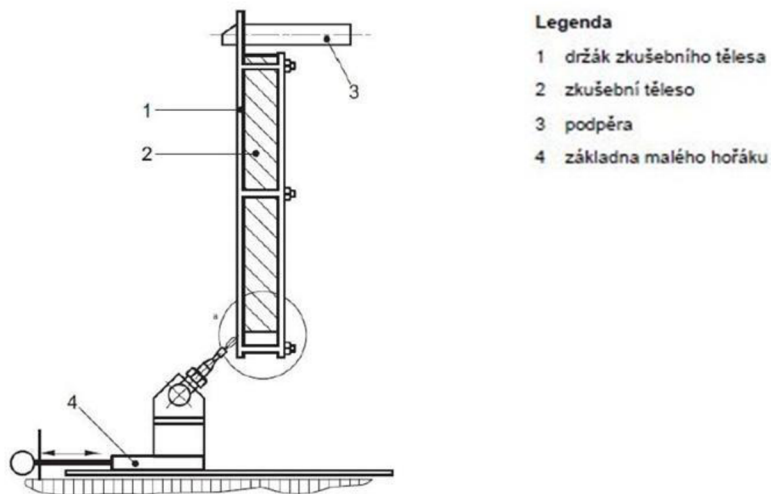
Na vzorky byla vyznačena vzdálenost 150 mm od zkoušené hrany v případě působení plamene na hranu. Pokud byl vzorek zkoušen působením plamene na plochu, byla ryska vyznačena 150 mm od místa působení plamene, které je



40 mm nad jeho spodním okrajem. Vzorek byl upevněn do držáku tak, aby nebyl nijak deformován a nezměnila se tak jeho objemová hmotnost. Držák se vzorkem byl umístěn na stojan do zkušební komory, která je opatřena prosklenými dvířkami a je z ní zajištěn odtah vzduchu o rychlosti proudění vzduchu  $0,70 \pm 0,10$  m/s. Ve zkušební komoře byla stanovena vnitřní teplota  $23 \pm 5$  °C a relativní vlhkost vzduchu  $50 \pm 20$  %. Zkušební komora má i prosklené boky, aby bylo možné pozorovat průběh zkoušky. Pod vzorek byl umístěn kovový tácek s papírkem, který případně zachytává odpadávající hořící části vzorku v průběhu zkoušky a při zkoušce se hodnotí, jestli jsou tyto částice papírek schopny zapálit. Na posuvném zařízení v komoře byl umístěn kahan, který byl nakloněn pod úhlem 45 °. Posuvné zařízení bylo opatřeno nastavitelnou záložkou, aby v průběhu zkoušky nedošlo k působení plamene na jiné vzdálenosti, než bylo nastaveno na to určeným kalibrem. Po zaaretování vzdálenosti byl kahan posunut dál od vzorku a zapálen. Výška plamene byla kalibračním zařízením nastavena na výšku 20 mm a poté byla uzavřena zkušební komora. Hořící kahan byl posunut o předem nastavenou vzdálenost a plamen na vzorek působil 15 s, poté byl hořák odtáhnut a vzorek byl ponechán dalších 5 s hořet, následně byl vzorek uhašen. Celkové trvání zkoušky pak bylo 20 s. Plamen na vzorek může působit i 30 s, ale vzhledem k předpokládaným vlastnostem vzorku bylo při měření zvoleno 15 s [23].



**Obrázek 25 - Zkušební komora pro zkoušku malým zdrojem plamene**



**Obrázek 26 - Zkušební zařízení pro zkoušku malým zdrojem plamene, zkoušení na hranu vzorku [23]**

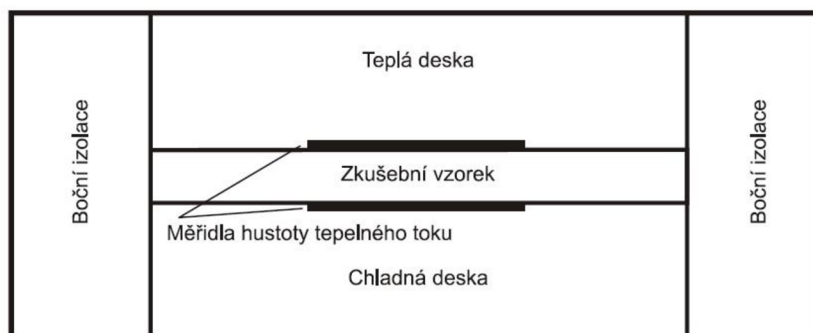
Při této zkoušce bylo zejména pozorováno, jestli došlo k zapálení vzorku a za jak dlouho dosáhla špička plamene výšky 150 mm od místa působení plamene. Byla zaznamenána i maximální výška plamene, která byla v průběhu zkoušky dosažena. Dále se bylo pozorováno, jestli případné odpadávající hořící části ze vzorku zapálily papírek umístěný pod zkoušeným vzorkem [23].



**Obrázek 27 - Příklad průběhu zkoušky malým zdrojem plamene, zkoušení na hranu**

## 10.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení této veličiny proběhlo podle ČSN 72 7012 – 3: Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku. Tato norma je zároveň v souladu s normami ČSN EN 12667 a ISO 8301. Při této zkoušce byla pozorována hustota tepelného toku pomocí měřidel hustoty tepelného toku, což je série diferenčních termočlánků. Tato měřidla jsou umístěna v rovině rozhraní zkoušeného vzorku a měřících desek. Měřící desky byly temperovány na konstantní teplotu a po dosažení tohoto stavu se provedlo odečtení napětí na měřidlech hustoty tepelného toku, které je úměrné hodnotě součinitele tepelné vodivosti zkušební vzorku. Tato metoda je sekundární a před samotným měřením je nutné měřící aparaturu kalibrovat referenčním vzorkem a stanovit konstantu, dle které se pak přepočítá naměřené napětí na hodnotu hustoty tepelného toku [71].



Obrázek 28 - Konstrukční schéma měřícího zařízení dle ČSN 72 7012-3 [11]

## 10.6 Stanovení činitele zvukové pohltivosti

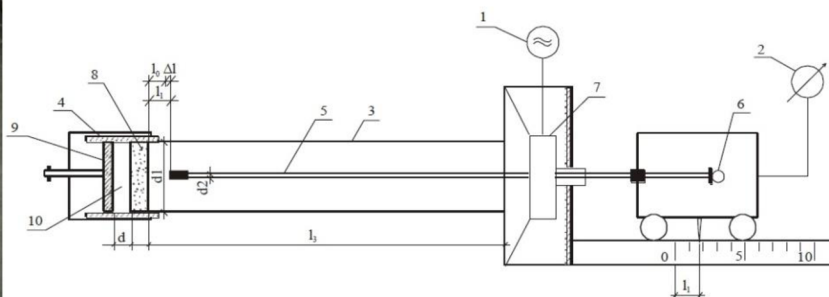
Stanovení činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno v třetinooktávových pásmech v závislosti na frekvenci dle ČSN ISO 10534 – 1: Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích. Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. Při měření se vytvoří stojaté vlnění v trubici, na jejímž konci je vzorek. Dochází k interferenci vlnění přicházejícího z akustického zdroje s vlněním odraženým od zkoumaného vzorku. Při výpočtu hledané veličiny se vychází z akustického tlaku v logaritmické závislosti, tedy

z hladiny akustického tlaku, u kterého se stanoví jeho maximum a minimum. Z rozdílů těchto dvou hodnot se stanoví hodnota činitele zvukové pohltivosti [72].

Soustava využita k tomuto měření se nazývá Kuntova trubice, která představuje interferometr. Její součásti jsou popsány na obrázku níže. Měří se obecně na kmitočtech třetinooktávové řady v rozsahu 250 – 6300 Hz. Na zkušebních vzorcích proběhlo měření v rozsahu 100 – 6300 Hz.



Legenda: 1 – generátor; 2- analyzátor; 3 – trubice; 4 – držák vzorku; 5 – sonda; 6 – mikrofon; 7 – reproduktor; 8 – vzorek; 9 – píst držáku; 10 – vzduchový polštář.



Obrázek 29 - Kuntova trubice [76]

## 11. Vyhodnocení zkoušek

Provedení a vyhodnocení zkoušek proběhlo v souladu s uvedenými normami. Nejdůležitější zkouškou je z hlediska zaměření této diplomové práce reakce na oheň. Stanovení součinitele tepelné vodivosti a činitele akustické pohltivosti bylo provedeno především proto, aby se zjistilo, jestli má povrchová úprava vzorku retardéry hoření nějaký vliv na tyto vlastnosti.

### 11.1 Stanovení reakce na oheň

Při této zkoušce bylo pozorováno, jestli dojde k zapálení vzorku, čas, za který dosáhne špička plamene výšky 150 mm od místa jeho působení, maximální dosažená výška špičky plamene a jestli v průběhu zkoušky došlo k odpadávání hořících částí ze vzorku a následně k zapálení filtračního papírku umístěného pod vzorkem v průběhu zkoušky.

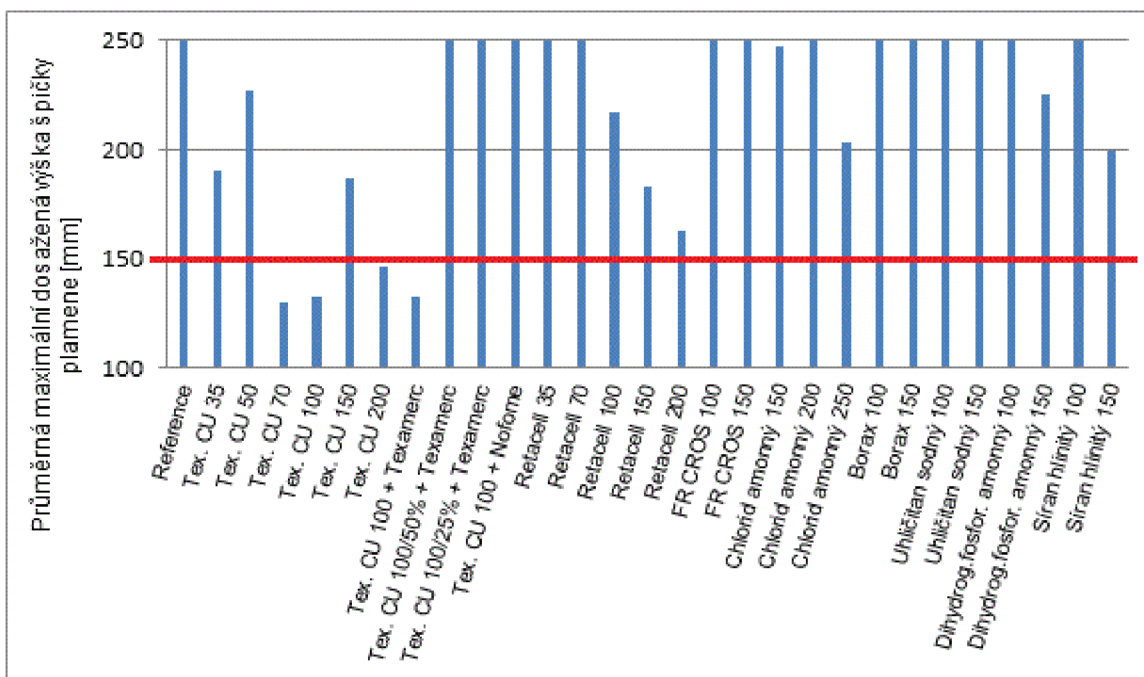
K zapálení filtračního papírku nedošlo u žádné ze zkoušek. Jako vypovídající veličiny o účinnosti retardérů hoření byly zvoleny maximální dosažená výška špičky plamene a čas, za který špička plamene dosáhla výšky 150 mm od místa jeho působení. Tyto veličiny byly vyjádřeny průměrnou hodnotou z provedených měření. Pro celkové vyhodnocení byl stanoven poměr mezi průměrnou maximální dosaženou výškou plamene a průměrným časem, za který špička plamene dosáhla výšky 150 mm od místa jeho působení. Pokud plamen této výšky nedosáhl, byla do výpočtu dosazena hodnota času 20 s, což je celková doba trvání zkoušky. Výsledky měření jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tabulka 9 – Maximální výška špičky plamene, zkoušení na hranu vzorku, čas trvání zkoušky 20 s

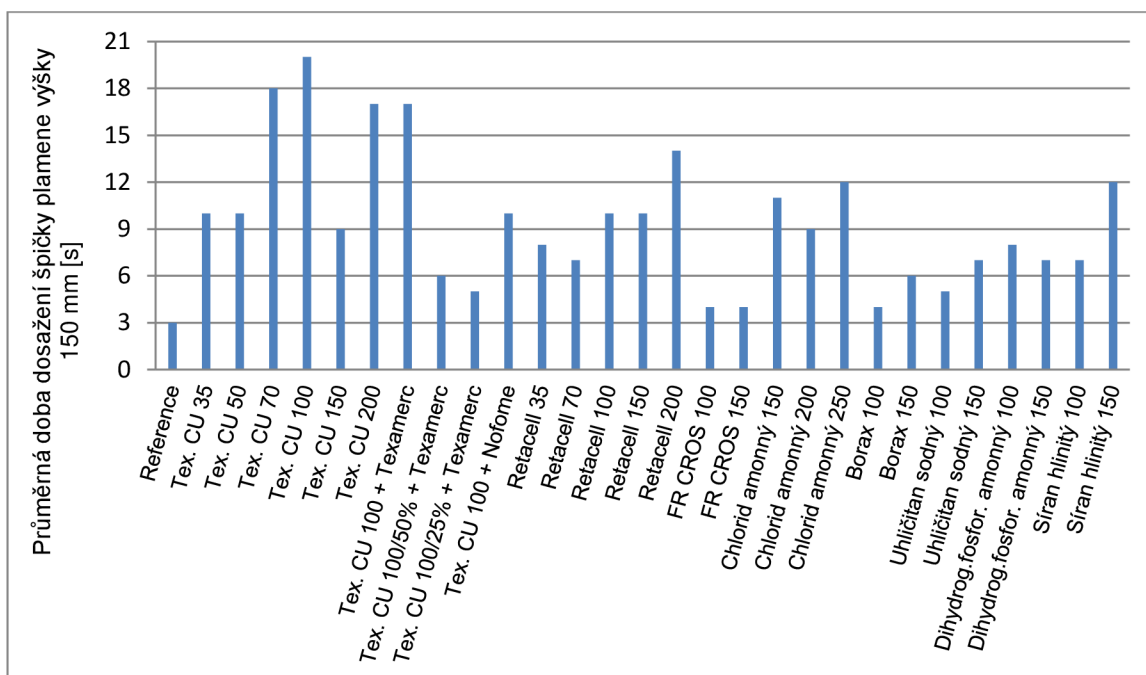
Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Hrana ošetřená				Hrana neošetřená				
		Max. výška plamene [mm]					Max. výška plamene [mm]			
		Vzorek			Ø [mm]	Vzorek			Ø [mm]	
1	2	3	1	2		3				
Reference	-	-	-	-	-	250	250	250	250	
Texaflam CU	35	160	150	250	187	200	190	180	190	
	50	220	220	240	227	-	-	-	-	
	70	130	60	60	83	150	140	100	130	
	100	60	50	140	83	140	140	120	133	
	150	150	140	-	145	190	170	200	187	
	200	110	130	-	120	190	110	140	147	
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	-	180	50	170	133	
	100 (50% koncentrace)	-	-	-	-	250	250	250	250	
	100 (25% koncentrace)	-	-	-	-	250	250	250	250	
Texaflam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	-	220	200	210	210	
Retacell	35	250	250	250	250	250	250	250	250	
	70	250	250	250	250	250	250	250	250	
	100	250	220	210	227	180	250	220	217	
	150	100	150	-	125	200	160	190	183	
	200	100	170	-	135	180	170	140	163	
FR CROS 584	100	250	250	250	250	-	-	-	-	
	150	250	250	250	250	-	-	-	-	
Stopfire (chlorid amonný)	150	250	240	250	247	-	-	-	-	
	200	250	250	250	250	-	-	-	-	
	250	150	210	250	203	-	-	-	-	
Borax	100	250	250	250	250	-	-	-	-	
	150	250	250	250	250	-	-	-	-	
Uhličitan sodný	100	250	250	250	250	-	-	-	-	
	150	250	250	250	250	-	-	-	-	
Dihydrogen fosforečnan amonný	100	110	-	-	110	250	250	-	250	
	150	110	-	-	110	240	210	-	225	
Síran hlinitý	100	250	250	250	250	-	-	-	-	
	150	220	230	150	200	-	-	-	-	

Tabulka 10 - Doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm od místa jeho působení, zkoušení na hranu vzorku, čas zkoušky 20 s

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Hrana ošetřená				Hrana neošetřená			
		Čas [s]				Čas [s]			
		Vzorek			Ø [s]	Vzorek			Ø [s]
		1	2	3		1	2	3	
Reference	-	-	-	-	-	5	3	2	3
Texafam CU	35	11	9	7	9	10	11	10	10
	50	8	11	10	10	-	-	-	-
	70	20	20	20	20	15	20	20	18
	100	20	20	20	20	20	20	20	20
	150	15	20	-	18	7	7	14	9
	200	20	20	-	20	10	20	20	17
Texafam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	-	16	20	14	17
	100 (50% koncentrace)	-	-	-	-	7	6	6	6
	100 (25% koncentrace)	-	-	-	-	6	5	5	5
Texafam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	-	10	7	12	10
Retacell	35	6	6	6	6	10	7	8	8
	70	5	8	8	7	7	7	6	7
	100	12	13	12	12	12	9	10	10
	150	20	15	-	18	10	10	9	10
	200	20	20	-	20	10	11	20	14
FR CROS 584	100	3	4	4	4	-	-	-	-
	150	3	4	4	4	-	-	-	-
Stopfire (chlorid amonný)	150	11	11	10	11	-	-	-	-
	200	9	8	9	9	-	-	-	-
	250	15	11	9	12	-	-	-	-
Borax	100	4	4	5	4	-	-	-	-
	150	7	6	6	6	-	-	-	-
Uhličitan sodný	100	4	6	6	5	-	-	-	-
	150	6	6	8	7	-	-	-	-
Dihydrogen fosforečnan amonný	100	20	-	-	20	8	7	-	8
	150	20	-	-	20	7	7	-	7
Síran hlinitý	100	7	8	7	7	-	-	-	-
	150	12	9	15	12	-	-	-	-



Graf 3 – Průměrná maximální dosažená výška špičkou plamene, zkoušení na hranu vzorku, čas trvání zkoušky 20 s



Graf 4 – Průměrná doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm, zkoušení na hranu vzorku, čas trvání zkoušky 20 s

### Dílčí závěr

Na základě provedených měření, i prvotního předpokladu, lze konstatovat, že výsledky měření na hranu jsou vždy horší než výsledky měření na plochu. Je patrné, že nedošlo k dostatečné penetraci retardérů hoření do výrobku. Pokud retardér hoření nefungoval, ani když plamen působil na hranu ošetřenou, byly by



výsledky ze zkoušení na hranu neošetřenou horší, a tak tyto zkoušky nebylo nutné v některých případech provádět. Pokud se jevil účinek retardéru hoření při působení plamene na ošetřenou hranu jako pozitivní, byla zkouška provedena i na hraně neošetřené. Retardér hoření Texaflam CU byl použit v kombinaci se smáčedlem a ředěný vodou za účelem zlepšení jeho penetrace do izolační rohože. Z výsledků je ale patrné, že ke zlepšení penetrace přidávkem smáčedla nedošlo, protože Texaflam CU v kombinaci se smáčedlem při působení plamene na neošetřenou hranu neúčinkoval ani při dávce  $100 \text{ g/m}^2$ , ale tato dávka bez smáčedla se na předchozí sadě vzorků projevila jako účinná. Obě použitá smáčedla mohla v tomto případě reakci na oheň i zhoršit. Vzorky ošetřené právě Texaflamem CU v dávce  $100 \text{ g/m}^2$  je možné dle ČSN EN 13501-1 klasifikovat do třídy reakce na oheň E [16]. Vzhledem k tomu, že v laboratorních podmínkách byly přípravky aplikovány nástřikem ručně, mohlo dojít k jejich nerovnoměrnému aplikování, a tak je tedy možné předpokládat, že do třídy reakce na oheň E, by mohly být zařazeny i vzorky ošetřené retardérem hoření Texaflam CU při dávkách  $70$  a  $200 \text{ g/m}^2$ , v těchto sadách vzorků nevyhověl vždy pouze jeden ze vzorků. Rozdílný výsledek u jednoho ze vzorků v těchto sadách mohlo způsobit i nehomogenitou materiálu a variabilitou jeho složení. Dihydrogenfosforečnan amonný v obou dávkách a retardér hoření Retacell v dávkách  $150$  a  $200 \text{ g/m}^2$  se jevily při zkoušení na ošetřenou hranu jako účinné, ale to se při zkoušení na hranu neošetřenou nepotvrdilo.

Z tabulek 9 a 10 je patrné, že použité retardéry byly schopné prodloužit dobu dosažení výšky  $150 \text{ mm}$  špičkou plamene a v některých případech i snížit dosaženou výšku špičky plamene, ale nebyly natolik účinné, aby se jimi ošetřené vzorky mohly klasifikovat do třídy reakce na oheň E. Nejméně účinný použitý retardér hoření byl FR CROS 584. Důvodem jeho neúčinnosti byla jeho malá rozpustnost, a jelikož nástřikem není možné na izolační rohož nanést velké množství roztoku, protože ho není schopna tolik vsáknout, nebylo na izolační rohož nanášeno dostatečné množství účinné látky. Tento retardér hoření byl účinný při dávce  $3 \text{ hmot. \%}$ , pokud byl nanášen nástřikem na recyklovaná bavlněná vlákna tak, jak tomu bylo v diplomové práci Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce, kterou vypracoval Ing. Tomáš Urbánek. Dále se v diplomové práci

od Ing. Tomáše Urbánka projevily jako účinné retardéry hoření Borax a dihydrogenfosforečnan amonný [55]. Ani jedna z těchto látek nebyla účinná, když se nanášela nástřikem na již zhotovenou izolační rohož. Z toho je možné usoudit, že problémem je malá rozpustnost solí ve vodě při normální teplotě a penetrace roztoku do rohože.

V následujících tabulkách jsou výsledky z měření pro zkoušení malým zdrojem plamene na plochu vzorku:

**Tabulka 11 – Maximální výška špičky plamene, zkoušení na plochu vzorku, čas trvání zkoušky 20 s**

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Max. výška plamene [mm]			Ø [mm]
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	
<b>Texafam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l</b>	100 (plná koncentrace)	100	110	90	100
	100 (50% koncentrace)	100	160	150	137
	100 (25% koncentrace)	140	180	130	150
<b>Texafam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l</b>	100 (plná koncentrace)	110	100	80	97

**Tabulka 10 - Doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm od místa jeho působení, zkoušení na plochu vzorku, čas zkoušky 20 s**

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Čas [s]			Ø [s]
		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	
<b>Texafam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l</b>	100 (plná koncentrace)	20	20	20	20
	100 (50% koncentrace)	20	14	16	17
	100 (25% koncentrace)	20	15	20	18
<b>Texafam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l</b>	100 (plná koncentrace)	20	20	20	20

### **Dílčí závěr**

Z výsledků zkoušky malým plamenem, který působí na plochu vzorku, se v případě, že byl vzorek ošetřen retardérem hoření, pozná především jeho účinnost. Texaflam CU výrazně zlepšuje reakci na oheň vzorků a smáčedla jeho účinnost nezlepšují. Z výsledků je patrné, že nejúčinnější je tento přípravek v případě, že je použit v kombinaci jen se smáčedlem a není ještě ředěný vodou.

### **Stanovení poměru průměrné maximální dosažené výšky špičky plamene a průměrného času dosažení špičky plamene výšky 150 mm od místa jeho působení**

Klasifikace vzorků do třídy reakce na oheň E byla možná pouze v případě ošetření vzorků retardérem hoření Texaflam CU při dávce  $100 \text{ g/m}^2$ . Aby bylo možné posoudit účinnost retardérů hoření, byl pro účely tohoto vyhodnocení zaveden poměr maximální dosažené výšky špičky plamene a času dosažení špičky plamene výšky 150 mm od místa jeho působení. U vzorku, kde nedošlo k dosažení výšky špičky plamene 150 mm, byla dosazena do poměru hodnota času 20 s, což bylo celkové trvání zkoušky. Z toho vyplývá, že nejpozitivnější vliv retardéru hoření na reakci na oheň se projevil u takového vzorku, který měl tento poměr nejmenší. Tyto poměry jsou pro jednotlivé retardéry hoření a jejich dávkování uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 11 – Poměr průměrné maximální dosažené výšky špičky plamene a průměrného času dosažení špičky plamene výšky 150 mm od místa jeho působení, zkoušení na hranu vzorku, čas zkoušky 20 s

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Hrana ošetřená			Hrana neošetřená		
		Ø max. výška plamene [mm]	Ø doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm [s]	Poměr výška/čas [-]	Ø max. výška plamene [mm]	Ø doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm [s]	Poměr výška/čas [-]
Reference	-	-	-	-	250	3	83
Texaflam CU	35	187	9	21	190	10	19
	50	227	10	23	-	-	-
	70	83	20	4	130	18	7
	100	83	20	4	133	20	7
	150	145	18	8	187	9	21
	200	120	20	6	147	17	9
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	133	17	8
	100 (50% koncentrace)	-	-	-	250	6	42
	100 (25% koncentrace)	-	-	-	250	5	50
Texaflam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l	100 (plná koncentrace)	-	-	-	210	10	21
Retacell	35	250	6	42	250	8	31
	70	250	7	36	250	7	36
	100	227	12	19	217	10	22
	150	125	18	7	183	10	18
	200	135	20	7	163	14	12
FR CROS 584	100	250	4	63	-	-	-
	150	250	4	63	-	-	-
Stopfire (chlorid amonný)	150	247	11	22	-	-	-
	200	250	9	28	-	-	-
	250	203	12	17	-	-	-
Borax	100	250	4	63	-	-	-
	150	250	6	42	-	-	-
Uhličitan sodný	100	250	5	50	-	-	-
	150	250	7	36	-	-	-
Dihydrogen fosforečnan amonný	100	110	20	6	250	8	31
	150	110	20	6	225	7	32
Síran hlinitý	100	250	7	36	-	-	-
	150	200	12	17	-	-	-

**Tabulka 12 - Poměr průměrné maximální dosažené výšky plamene a průměrného času dosažení plamene výšky 150 mm, zkoušení na plochu vzorku, čas zkoušky 20 s**

Přípravek	Dávkování [g/m <sup>2</sup> ]	Ø výška špičky plamene [mm]	Ø doba dosažení špičky plamene výšky 150 mm [s]	Poměr výška/čas [-]
Texaflam CU + smáčedlo Texamerc MN 5 g/l	100 (plná koncentrace)	100	20	5
	100 (50% koncentrace)	137	17	8
	100 (25% koncentrace)	150	18	8
Texaflam CU + smáčedlo Nofome AF 5 g/l	100 (plná koncentrace)	97	20	5

### Dílčí závěr

Z naměřených hodnot a stanoveného poměru vyplývá, že nejúčinnější byl tedy retardér hoření Texaflam CU při dávce 70 a 100 g/m<sup>2</sup>. Nejméně účinný byl retardér hoření FR CROS 584 při obou dávkách (100 a 150 g/m<sup>2</sup>) a Borax při dávce 100 g/m<sup>2</sup>.

## 11.2 Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti

Tyto vlastnosti byly zjišťovány u vzorků, na kterých poté byl určen součinitel tepelné vodivosti. Jednalo se o dvě sady dvou vzorků referenčních a o dvě sady dvou vzorků ošetřených retardérem hoření Texaflam CU při dávce 100 g/m<sup>2</sup>. Stanovení těchto vlastností izolantu bylo stanoveno dle již uvedených norem.

**Tabulka 13 - Stanovené lineární rozměry, tloušťka a objemová hmotnost izolantu**

Přípravek	Vzorek	l [mm]	b [mm]	t [mm]	m [g]	ρ <sub>v</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
Reference	1	605	590	93,2	1337,8	40,2
	2	600	585	92,0	1218,3	37,7
Texaflam CU 100 g/m <sup>2</sup>	1	593	582	89,0	1288,1	41,9
	2	601	598	88,0	1244,3	39,3

Výrobní objemová hmotnost vzorků měla být 32 kg/m<sup>3</sup>. Z výsledků je patrné, že i neošetřené referenční vzorky ji měly až o 8 kg/m<sup>3</sup> větší. Použití retardéru hoření nemělo na objemovou hmotnost žádný vliv.

### 11.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

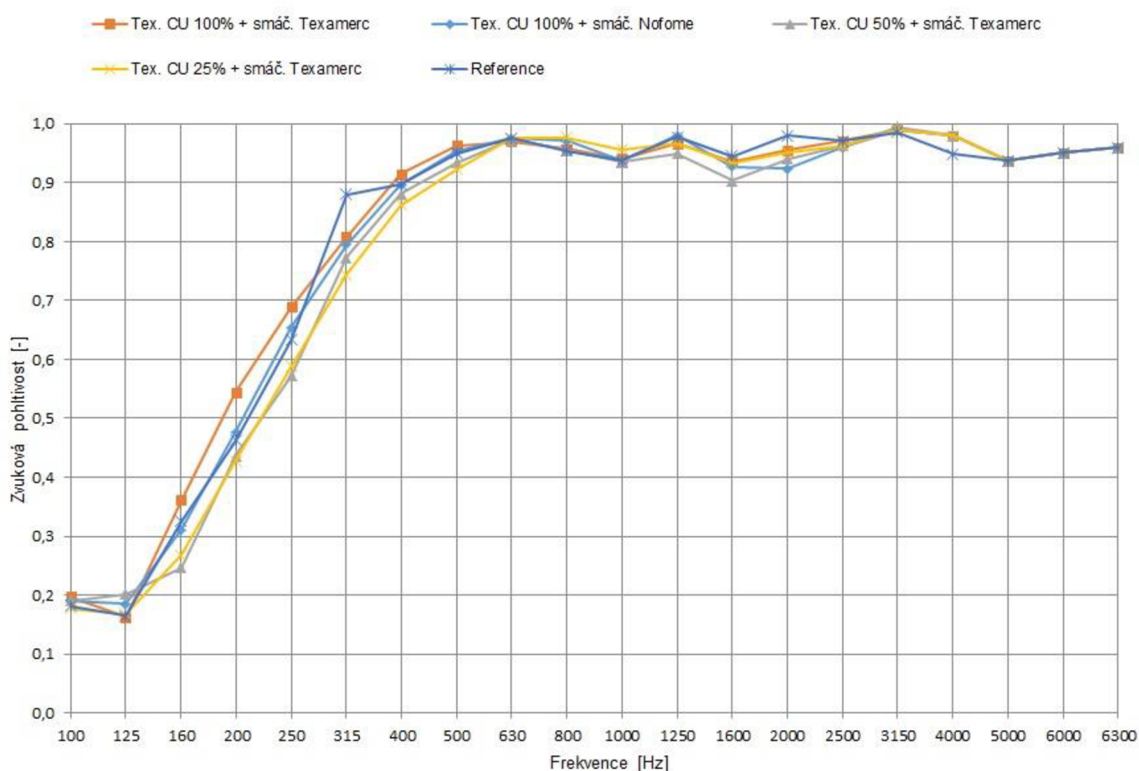
Jelikož je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  klíčovou vlastností tepelných izolací, bylo stanovení součinitele tepelné vodivosti provedeno, aby se zjistilo, jestli ošetření izolantu retardéry hoření tuto veličinu nějak ovlivňuje. Měření proběhlo na 2 referenčních vzorcích a 2 vzorcích ošetřených retardérem hoření Texaflamem CU při dávce  $100 \text{ g/m}^2$ . Všechny tyto vzorky byly před měřením kondicionovány v laboratorních podmínkách. Z výsledků se ukázalo, že vliv použití retardéru hoření na součinitel tepelné vodivosti je pouze nepatrný, a to v řádu deseti tisícin.

Tabulka 14 - Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Ošetření přípravkem	Vzorek	Měření součinitele tepelné vodivosti [W/(m·K)]			Ø $\lambda$ [W/(m·K)]
		1	2	3	
Reference	1	0,03577	0,03567	0,03578	0,03567
	2	0,03567	0,03561	0,03562	0,03563
Texaflam CU $100 \text{ g/m}^2$	1	0,03595	0,03582	0,03579	0,03585
	2	0,03576	0,03576	0,03577	0,03576

## 11.4 Stanovení činitele zvukové pohltivosti

Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci byl stanoven metodou poměru stojaté vlny dle ČSN ISO 10534-1 v rozsahu 100 – 6300 Hz. Průběh hodnot byl stanoven na sadě referenčních vzorků a na 4 sadách vzorků ošetřených různými retardéry hoření, aby se zjistilo, jestli má použití přípravků na tuto vlastnost nějaký vliv. Z grafu níže vyplývá, že použité přípravky nemají na hodnotu činitele zvukové pohltivosti žádný signifikantní vliv.



Graf 5 – Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci

## 12. Závěr

Tato diplomová práce se věnovala vývoji tepelných a akustických izolačních materiálů na bázi druhotných textilních vláken nižší kvality. Cílem práce bylo navrhnout, a především modifikovat tyto izolanty tak, aby z hlediska reakce na oheň vyhověly požadavkům pro zabudování do stavebních konstrukcí a vykazovaly třídu reakce na oheň E nebo lepší. V rámci práce bylo na ošetřených izolantech retardéry hoření dále ověřeno, jestli má použití vybraných přípravků vliv na akustické a tepelné vlastnosti izolantu. Na základě literární rešerše byla pro výrobu izolantů zvolena recyklovaná textilní vlákna nižší kvality pocházející ze sběrného textilu, určeného k odvozu na skládku či zpracování ve spalovně. Jedná se o směs různých typů vláken s převažujícím podílem polyesteru a bavlny. Izolant byl vyroben a dodán firmou Retex a.s. Na základě rešerše a průzkumu trhu byly zvoleny chemické látky pro úpravu reakce na oheň izolantu. Byl vybrán retardér hoření Texaflam CU od firmy Inotex, retardér hoření Retacell od firmy Movychem, retardér hoření FR CROS 584 od firmy Brenntag, retardér hoření Stopfire (báze chloridu amonného) od firmy Divadelní služby, tetraboritan sodný dekahydrát (borax), uhličitan sodný, dihydrogenfosforečnan amonný a síran hlinitý. V rámci práce byla snaha mimo ověření vhodnosti použití jednotlivých výše uvedených přípravků zhodnotit také jejich možné nanášení ve formě nástřiku, který představuje v současné době nejlevnější a nejjednodušší cestu, jak docílit úpravy již vyrobených izolačních rohoží. Namáčení vláken do roztoků retardéru hoření se z hlediska energetické a časové náročnosti v předchozích pracích ukázalo jako komplikované až nereálné řešení (především z pohledu výsledných nákladů na výrobu izolantu). Na 4 sadách vzorků byla použita smáčedla pro zlepšení penetrace retardéru hoření do izolantu, a to konkrétně smáčedlo Nofome AF a Texamerc MN od firmy Inotex. Retardéry hoření byly na izolanty nanášeny v různých koncentracích. Po aplikaci přípravků byly vzorky vysušeny týden v laboratorních podmínkách do ustálené hmotnosti.

Pro stanovení reakce na oheň byla provedena zkouška malým zdrojem plamene dle normy ČSN EN ISO 11925 – 2 [23]. Všechny použité látky zpomalily oproti referenčnímu vzorku rychlost hoření, ale podmínky pro klasifikaci do třídy reakce na oheň E dle ČSN EN 13501-1 splnily pouze vzorky ošetřené retardérem hoření



Texaflam CU při dávce 100 g/m<sup>2</sup> [16]. Vzhledem k tomu, že v laboratorních podmínkách byly přípravky aplikovány nástřikem ručně, mohlo dojít k jejich nerovnoměrnému aplikování. Je tedy možné předpokládat, že do třídy reakce na oheň E, by mohly být zařazeny i vzorky ošetřené retardérem hoření Texaflam CU při dávkách 70 a 200 g/m<sup>2</sup>, v těchto sadách vzorků nevyhověl vždy pouze jeden ze vzorků. Cílem bylo stanovit, který z retardérů hoření funguje nejlépe a z výsledků měření je patrné, že se jedná o retardér hoření Texaflam CU od firmy Inotex. Jako nejméně účinný se projevil retardér hoření FR CROS 584 a soli, které navíc při aplikaci nástřikem ucpávaly trysku postřikovače, a práce s nimi byla složitá.

Použitá smáčedla v kombinaci s retardérem hoření Texaflam CU měla zlepšit penetraci přípravku do izolantu, aby stejně dobrou reakci na oheň vykazovaly i vzorky, u kterých se plamen nechal působit na neošetřenou hranu vzorku. Smáčedla reakci na oheň, pokud plamen působil na hranu vzorku, nezlepšila.

Co se týče samotné aplikace retardérů hoření nástřikem na již hotový izolant, jevila se tato metoda jako méně efektivní než aplikace retardérů hoření namáčením vláken ještě před tím, než je z nich izolant zhotoven. V již uskutečněných pokusech v práci *Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce* byl účinným způsobem aplikace retardérů hoření nástřik na recyklovaná bavlněná vlákna, která byla ošetřena boraxem, kyselinou boritou, dihydrogenfosforečnanem amonným a retardérem hoření FR CROS 584 při dávce 3 hmot.% [55]. V případě pokusů v této diplomové práci byly látky dávkovány na plochu izolantu a ne hmotnostně na reálné množství vláken v objemu izolantu. Dávkování retardérů hoření plyne ze způsobu jejich aplikace na plochu hotového izolantu nástřikem. Toto řešení je teoreticky vhodné především pro izolanty větších tloušťek, kde dojde k ošetření pouze povrchových vrstev a tím pádem je možné použít i menší množství retardéru hoření na objem izolantu (oproti aplikaci na vlákna před vytvořením rohože). Tato skutečnost je poměrně klíčová z hlediska výsledných nákladů na výrobu izolantu a jeho cenu. Izolant byl zhotoven ze směsi recyklované bavlny a polyesteru (a dalších typů vláken), a jak vyplynulo z literární rešerše, hořlavost (reakce na oheň) této směsi je horší než u čistého polyesteru anebo čisté bavlny [38, 48]. Tyto látky byly navíc

účinné na čisté recyklované bavlně, v případě této diplomové práce se jednalo o směs recyklované bavlny a polyesteru (a dalších typů vláken). Oba typy těchto vláken mají jiný proces tepelného rozkladu a nemusí na ně být účinná stejná látka. Pro zvýšení účinnosti retardérů hoření by v případě jejich průmyslové aplikace bylo vhodné provádět nástřik pod větším tlakem s jemnější tryskou a retardéry by tak pronikly hlouběji do izolantu a došlo by i k jejich lepší distribuci po ploše izolantu (při menším poloměru kapek). Další možnou vhodnou úpravou průmyslové technologie nástřiku retardérů by mohlo být zvýšení rozpustnosti solí, např. zvýšením teploty vody, a tak by se na plochu vzorku mohlo se stejným objemem roztoku dostat i více účinné látky při menším podílu vody. Množství nanášeného roztoku bylo limitováno schopností izolantu zadržovat vodu. Pro průmyslovou aplikaci přípravků by bylo vhodné vylepšit technologii nástřiku a ověřit vlastnosti na větším počtu vzorků a měření vyhodnotit přesně podle normy ČSN EN 13501-1.

Další zkoušky potvrdily předpoklad, že aplikace retardérů hoření neovlivňuje negativně klíčové vlastnosti izolantu. Stanovení průběhu činitele zvukové pohltivosti ukázalo, že ošetření izolantu retardéry hoření nemá na tuto vlastnost žádný signifikantní vliv. Stejně tomu bylo u součinitele tepelné vodivosti, který byl v případě ošetřených vzorků retardérem hoření Texaflam CU v dávce 100 g/m<sup>2</sup> okolo 0,035 W/(m·K), což je srovnatelné s pěnovým polystyrenem, skelnou a minerální vatou [11]. Za předpokladu, že budou dodrženy legislativní požadavky, by vhodná aplikace izolantu z recyklovaných textilních vláken nižší kvality byla jako výplňová tepelná izolace stěn v obvodových pláštích dřevostaveb, jako izolace vnitřních dělicích konstrukcí a izolace šikmých střech.

## Seznam použité literatury

- [1] SHAFIQUL, Islam a Bhat GAJANAN. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of Environmental Management*. Athens, USA, 2019, (251), 1-21.
- [2] Jaký byl rok 2019. *recyklujemetextil.cz*. [Online] 2019. [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.recyklujemetextil.cz/media/proc-recyklovat/big/5e387165d3adf-2019-infografika-985x1825-na-web.jpg>.
- [3] Aktualizace politiky druhotných surovin ČR pro období 2019-2022. In: *Mpo.cz* [online]. Praha, 1.8.2019 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Politika-druhotnych-surovin-CR.pdf>
- [4] KEPÁK, František. *Průmyslové odpady*. Ústí nad Labem : Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2005. 978-80-7414-228-4.
- [5] O nás. *retex.cz*. [Online] RETEX a.s. [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.retex.cz/o-nas-2/>.
- [6] UltraTouch Denim Insulation. *bondedlogic.com*. [Online] Bonded Logic Inc. [Citace: 2. 1. 2021.] <https://www.bondedlogic.com/ultratouch-denim-insulation/>.
- [7] Thermal Insulation. *inno-therm.com*. [Online] Recovery Insulation Ltd. [Citace: 2. 1. 2021.] <http://www.inno-therm.com/product-information/thermal-applications/>.
- [8] BLAGOEVA, D. T. a C. C. Pavel. *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018. 978-92-79-74069-5.
- [9] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Fyzika stavebních látek: Fyzikální vlastnosti stavebních látek*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [10] ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [11] ZACH, Jiří. *Speciální izolace: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [12] HALAHYJA, M. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. Bratislava: Jada group, 1998.
- [13] Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: 63. 2006.
- [14] Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby. In: 81. 2009.
- [15] Vyhláška č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb. In: 10. 2008.

- [16] ČSN EN 13 501-1. Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle zkoušek reakce na oheň. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [17] Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů. In: 74. 2000.
- [18] Zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů. In: 41. 2001.
- [19] Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů. In: 115. 2000.
- [20] ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [21] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [22] ČSN 73 0802. Požární bezpečnost staveb. Nevýrobní objekty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [23] ČSN EN ISO 11925-2. Zkoušení reakce na oheň - Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene - Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [24] European Assessment Document - Factory-made Thermal and Acoustic Insulations Made of Polyester Fibres. *eota.eu*. [Online] 4 2016. [Citace: 30. 12. 2020.] <https://www.eota.eu/handlers/download.ashx?filename=ead-in-ojeu%2fead-040288-00-1201-ojeu2016.pdf>.
- [25] European Assessment Document - Factory-made thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable or animal fibres. *eota.eu*. [Online] 4 2016. [Citace: 30. 12. 2020.] <https://www.eota.eu/handlers/download.ashx?filename=ead-in-ojeu%2fead-040005-00-1201-factory-made-thermal-acoustic-insulation-products-vegetable-animal-fibres-2015rev-2016rev.pdf>
- [26] Zákon č. 541/2020 Sb. Zákon o odpadech. Praha, 2020. In: 222.
- [27] Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech. Praha, 2001. In: 71.
- [28] Vyhláška č. 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů. Praha, 2016. In:38.
- [29] WANG, Youjiang. Fiber and Textile Waste Utilization. *Waste and Biomass Valorization*. 2010, 1(1), 135-143. ISSN 1877-2641. Dostupné z: doi:10.1007/s12649-009-9005-y
- [30] Divinová, Jana. Recyklace textilu se v Evropě nevyplatí. Pětina oděvů putuje zpět do Asie. *idnes.cz*. [Online] 30. 7. 2017. [Citace: 20. 12. 2020.] Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/recyklace-textilu-stare-obleceni-indie.A170725\\_2340789\\_ekonomika\\_rts](https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/recyklace-textilu-stare-obleceni-indie.A170725_2340789_ekonomika_rts).

- [31] Ishfaq, Muhammad. *Infrared Technology and its Applications in Textile Recycling Technology Improving Sustainability in Clothing Industry* [online]. Lahti, 2015 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.theseus.fi/handle/10024/103950>. Master's thesis. Lahti University of Applied Sciences.
- [32] Boulding, Kenneth E. The Economics of the coming spaceship earth. *Resources for the future/John Hopkins University Press*,. 1966.
- [33] Ellen MacArthur Foundation. *Ellen MacArthur Foundation: Towards the Circular Economy Vol.1.* [Online] 2013. [Citace: 2. 1. 2021.] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
- [34] JONÁŠOVÁ, Soňa. *Cirkulární Česko: + Příklady úspěšných českých projektů* [online]. In: . 10.8.2018, s. 4-6 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://incien.org/publikace/publikace-ke-stazeni/>
- [35] MCDONOUGH, William a Michael BRAUNGART. *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. 1. New York: North Point Press, 2002. ISBN 0-86547-587-3.
- [36] Jana Mlynářová *Vývoj izolačních materiálů z druhotných textilních vláken*. Brno, 2019. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
- [37] Cirkulární ekonomika. *incien.org*. [Online] Institutu cirkulární ekonomiky. [Citace: 2. 1. 2021.] <https://incien.org/cirkularni-ekonomika/>.
- [38] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN isbn80-7083-644-x.
- [39] KOZLOWSKI, Ryszard a Maria MACKIEWICZ-TALARCZYK. *Handbook of Natural Fibres*. Volume 1: Types, Properties a Factors Affecting Breeding a Cultivation. USA: Elsevier Science Publishing Co, 2020.
- [40] Textilní vlákna jako surovina a jejich identifikace. *bagydesign.cz*. [Online] [Citace: 2. 1. 2021.] <https://www.bagydesign.cz/textilni-vlakna-jako-surovina-a-jejich-identifikace/>.
- [41] Bc. Pavel Břicháček *Studium možnosti optimalizace vlastností alternativních tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken*. Brno, 2014. 98 s., 102 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.
- [42] MATHER, Robert R. a Roger H. WARDMAN. *The Chemistry of Textile Fibres*. Edition 2. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2015. ISBN 978-1-78262-636-7.
- [43] The Lifecycle Assessment of Organic Cotton Fiber. *textileexchange.org*. [Online] [cit. 2020-12-31] [textileexchange.org/wp-content/uploads/2017/06/TE-LCA\\_of\\_Organic\\_Cotton-Fiber-Summary\\_of-Findings.pdf%20](https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2017/06/TE-LCA_of_Organic_Cotton-Fiber-Summary_of-Findings.pdf%20).

- [44] *Rostlinná vlákna: Učební texty Fakulty textilní* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [45] HAKIMI, Osnat a KNIGHT, David P., VOLLRATH, Fritz, VADGAMA, Pankaj. *Spider and mulberry silkworm silks as compatible biomaterials. Composites*. 2006.
- [46] Worldwide production volume of chemical and textile fibres from 1975 to 2019. *statista.com*. [Online] [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.statista.com/statistics/263154/worldwide-production-volume-of-textile-fibers-since-1975/>.
- [47] *Syntetická vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjgHYHY0YruAhXQ26QKHR\\_DBSkQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Flearning.tul.cz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D115254&usg=AOvVaw3GAHfuyI\\_pFPmMXCRNt39d](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjgHYHY0YruAhXQ26QKHR_DBSkQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Flearning.tul.cz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D115254&usg=AOvVaw3GAHfuyI_pFPmMXCRNt39d)
- [48] GROVER, T., A. KHANDUAL a A. LUXIMON. Fire Protection: Flammability and textile fibres. *Colourage* [online]. 2014, (39) [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/287938487\\_Fire\\_protection\\_Flammability\\_and\\_textile\\_fibres#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/287938487_Fire_protection_Flammability_and_textile_fibres#fullTextFileContent)
- [49] YANG, Charles Q., Qingliang HE, Richard E. LYON, Yuan HU. Investigation of the flammability of different textile fabrics using. *Polymer Degradation and Stability*. 2010, 95.
- [50] HORROCKS, Richard A. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovatory solutions. *Polymer Degradation and Stability*. 2010, 96.
- [51] *tayloredge.com. Ignition Temperatures of Materials*. [Online] [Citace: 30. 12. 2020.] [https://www.tayloredge.com/reference/Science/ignition.html?fbclid=IwAR2viA7DYkcdMBAh-IgG7CRTPUQMbsEsYb0YyFKn\\_yvoCymABk3wey2y9qg](https://www.tayloredge.com/reference/Science/ignition.html?fbclid=IwAR2viA7DYkcdMBAh-IgG7CRTPUQMbsEsYb0YyFKn_yvoCymABk3wey2y9qg).
- [52] Svatoňová, Pavla. *Funkční outdoorové oblečení*. Liberec : Bakalářská práce, 2007. *Funkční outdoorové oblečení* [online]. Liberec, 2007 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <http://dspace.tul.cz/handle/15240/3602>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Ing. Hana Štočková.
- [53] Zátěr a membrána. *outdoorguide.cz*. [Online] 27. 11 2009. [Citace: 30. 12. 2020.] <http://outdoorguide.cz/zater-a--membrana-40.html>.
- [54] Flame Retardant Finishes, Combustion of Cellulose, Flame Retardant Chemicals. *TechnicalTextile.net*. [Online] [Citace: 4. 1. 2021.] <https://www.technicaltextile.net/articles/flame-retardant-finishes-for-cellulose-3098>.
- [55] Urbánek, Bc. Tomáš. *Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce*. Brno : 68 s. Diplomová práce. Vysoké učení

technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D., 2018.

[56] LU, Yi. Yaling JIA, Yang ZHOU, Jie ZOU, Guangxian ZHANG, Fengxiu ZHANG. Straightforward one-step solvent-free synthesis of the flame retardant for cotton with excellent efficiency and durability. *Carbohydrate Polymers*. 2018, 201.

[57] Polyethylentereftalát. *wikiwand.com*. [Online] [Citace: 4. 1. 2021.] <https://www.wikiwand.com/cs/Polyethylentereftal%C3%A1t>.

[58] Degradace textilních materiálů. *Přednášky Masarykovy univerzity*. [Online] 2011. [Citace: 4. 1. 2021.] [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjRreO\\_4TuAhXG26QKHQe7AGsQFjADegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fis.muni.cz%2Ffel%2F1431%2Fjaro2011%2FC5985%2Fum%2FDegradace\\_textilu.pdf&usg=AOvVaw3bQ-Y4pCoATGvKE912Tb9g](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjRreO_4TuAhXG26QKHQe7AGsQFjADegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fis.muni.cz%2Ffel%2F1431%2Fjaro2011%2FC5985%2Fum%2FDegradace_textilu.pdf&usg=AOvVaw3bQ-Y4pCoATGvKE912Tb9g).

[59] Emil Braun, Barbara C. Levin. *Polyesters: A Review of the Literatry on Products of Combustion and Toxicity*. Gaithersburg : U.S. Department of Commerce, 1985.

[60] PETROVÁ, Šárka, Petr SOUDEK a Tomáš VANĚK. Retardanty hoření, jejich použití a vliv na životní prostředí. *Chemické listy*. Praha, 2015, (109).

[61] Woffová, H. *Teplotní degradace dřeva s aplikací retardérů hoření*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek, 2018.

[62] Oldřich Jirsák, Klára Kalinová. Netkané textilie. [Online] 2003. [Citace: 2. 1. 2021.] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiD97j-sP3tAhXHO-wKHcm0AUQQFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fnanoed.tul.cz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D547&usg=AOvVaw1p7UhsBa2hVsnrNTYYb8nb>.

[63] Hruza, Jakub. Zpracování odpadů textilních a polymerních: Textilní způsob zpracování. [Online] [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiBue-c1pbuAhXHtKQKHQOdBSQQFjABegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Ffiles.jakub-hruza.webnode.cz%2F200000017-dbb08dda41%2FZpracov%25C3%25A1n%25C3%25AD%2520odpad%25C5%25AF%25205%2520a%25206.pdf&usg=AOvVaw28o18cZ08JgGNrBtNtaKSs>

[64] Jandusová, Martina. Jak nastartovat recyklaci textilu? *prumyslovaekologie.cz*. [Online] 12. 6. 2020. [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/jak-nastartovat-recyklaci-textilu->.

[65] Kontejnery. *recyklace-textilu.cz*. [Online] [Citace: 31. 12. 2020.] <http://www.recyklace-textilu.cz/sluzby/kontejnery/>.

- [66] Jak se recykluje textil. *trideniodpadu.cz*. [Online] [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-textil>.
- [67] Tearing Machine of Rags and Garmets. *nhntextilemachinery.com*. [Online] [Citace: 31. 12. 2020.] <https://www.nhntextilemachinery.com/textile-waste-recycling-machine/tearing-machine-of-rags-and-garments.html>.
- [68] Chobola, Ondřej. *Retardéry hoření dřeva*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Katedra požární ochrany, 2012.
- [69] Stopfire. *zanolo.eu*. [Online] Zanolo S.p.A. [Citace: 4. 1. 2021.] <http://zanolo.eu/en/textile-solutions-en/solutions/stopfire-en>.
- [70] FR CROS 584. *coatings.specialchem.com*. [Online] SpecialChem. [Citace: 4. 1. 2021.] <https://coatings.specialchem.com/product/a-budenheim-fr-cros-584>.
- [71] ČSN 72 7012 – 3. Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku. Praha, 1994. Český normalizační institut.
- [72] ČSN ISO 10534-1. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedačních trubicích: Metoda poměru stojaté vlny. Praha : ČNI, 1999.
- [73] ČSN EN 822. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení délky a šířky. Praha : ČNI, 2013.
- [74] ČSN EN 823. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky. Praha : ČNI, 1996.
- [75] ČSN EN 1602. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení objemové hmotnosti. Praha : ČNI, 2013.
- [76] S. Šťastník, J. Zach. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno : CERM, 2002. ISBN 80-214-2253-X.