



# 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

# NÁVRH A VÝVOJ EKOLOGICKÉHO IZOLAČNÍHO MATERIÁLU NA BÁZI PŘÍRODNÍCH SUROVIN

DESIGN AND DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL INSULATION MATERIAL BASED  
ON NATURAL RAW MATERIALS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lucie Šťastná

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Lucie Šťastná
Název	Návrh a vývoj ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

---

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

---

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



## PODKLADY A LITERATURA

- [1] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009
- [2] Slípková, A., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012
- [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.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [6] ŠTASTNÍK, 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
- [7] ČSN EN 14064-1 Tepelně izolační výrobky pro stavby - Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ - Část 1: Specifikace výrobků před zabudováním
- [8] ČSN EN 14064-2 Tepelně izolační výrobky pro stavby - Výrobky z foukané minerální vlny vyráběné in-situ - Část 2: Požadavky na zabudované výrobky
- [9] EAD 040138-01-1201 In-situ formed loose fill thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable fibres

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce se bude věnovat návrhu ekologické foukané izolace využívající přírodní suroviny (primární nebo druhotné), jako je například dřevo (v různých formách), suroviny pocházející ze zemědělství (len, konopí, sláma) a suroviny pocházející z průmyslu a komunálního odpadu (například recyklovaný papír). Vyvíjený izolant by měl být použitelný, jako tepelná a (nebo) akustická izolace především pro oblast ekologických dřevostaveb. V rámci teoretické části bakalářské práce bude provedena rešerše současného stavu v dané oblasti a budou vytipovány druhotné suroviny, které by bylo možné pro vývoj ekologického izolantu využít. Dále bude proveden návrh jednoho nebo více typů izolantu s tepelně izolačními i akustickými vlastnostmi, který by bylo možné použít ve formě foukané izolace v oblasti novodobých konstrukcí.

V rámci praktické části bakalářské práce bude proveden, na základě výsledků teoretické části, návrh složení konkrétního ekologického izolantu, který bude za laboratorních podmínek vyroben a budou ověřeny jeho klíčové vlastnosti. (Rozsah práce cca 40 - 50 stran).

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vývojem nového izolačního materiálu na bázi přírodních surovin. V teoretické části je vytvořen přehled dostupných druhů fukaných izolací a jsou popsány vybrané přírodní suroviny s jejich možným využitím jako tepelná a akustická izolace pro oblast ekologických dřevostaveb. Praktická část se zabývá ověřením klíčových vlastností vyrobených vzorků izolantu. Cílem bakalářské práce je optimálně modifikovat fukanou izolaci na bázi recyklovaného papíru dřevní štěpkou z kořenových náběhů, pro dosažení lepších akustických vlastností recyklovaného papíru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

fukané izolace, přírodní suroviny, ekologický izolační materiál, tepelně izolační a akustické vlastnosti, dřevní štěpka, recyklovaný papír

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the development of a new insulating material based on natural raw materials. In theoretical part, there is an overview of available types of loose fill insulation along with description of selected natural raw resources and their possible use as thermal and acoustic insulation for the area of ecological woodwork building. The practical part deals with the verification of key characteristics of manufactured samples of insulator. The goal of the bachelor thesis is to optimally modify loose fill insulation based on recycled paper with woodchips from roots to achieve better acoustic properties of recycled paper.

## **KEYWORDS**

loose fill insulation, natural raw materials, ecological insulation material, thermal insulation and acoustic properties, woodchips, recycled paper

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Lucie Šťastná *Návrh a vývoj ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin*. Brno, 2022. 62 s. Bakalářská 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 bakalářské práce s názvem *Návrh a vývoj ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

---

Lucie Šťastná  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Návrh a vývoj ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

---

Lucie Šťastná  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, věnovaný čas, trpělivost a vstřícný přístup během vypracovávání práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janu Bubeníkovi a Ing. Vítězslavovi Novákovi za rady a pomoc při měření v praktické části. V neposlední řadě chci poděkovat také rodině a přátelům za jejich velkou podporu během studia i při vypracovávání bakalářské práce.

# OBSAH

<b>I.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>II.</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>Tepelně technické a akustické požadavky na stavební konstrukce ...</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Tepelně izolační materiály .....</b>	<b>14</b>
2.1	Klíčové vlastnosti a požadavky.....	14
2.1.1	Tepelně izolační vlastnosti .....	15
2.1.2	Akustické vlastnosti .....	15
2.2	Dělení tepelně izolačních materiálů .....	16
<b>3</b>	<b>Foukané izolace .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Vlastnosti a požadavky na foukané izolace.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Druhy foukaných izolací .....</b>	<b>19</b>
3.2.1	Foukaný polystyren .....	19
3.2.2	Izolace z minerální vlny .....	20
3.2.3	Izolace ze skelné vlny.....	21
3.2.4	Dřevovláknitá izolace.....	22
3.2.5	Celulósová izolace .....	22
3.2.6	Další druhy foukaných (syhkých) izolací.....	23
<b>3.3</b>	<b>Suroviny pro výrobu foukaných izolací .....</b>	<b>27</b>
3.3.1	Přírodní organické (obnovitelné) suroviny.....	27
3.3.2	Přírodní suroviny rostlinného původu.....	28
3.3.3	Přírodní suroviny živočišného původu.....	32
3.3.4	Přírodní suroviny uplatnitelné pro nové výrobky v rámci ČR.....	33
<b>III.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>34</b>
<b>4.</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>34</b>
<b>5.</b>	<b>Metodika práce .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Zkušební vzorky.....</b>	<b>37</b>
<b>6.</b>	<b>Zkušební metody.....</b>	<b>38</b>
6.1.	Stanovení zrnitosti – síťový rozbor .....	38
6.2.	Stanovení sypné hmotnosti .....	39
6.3.	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	40

6.4.	Stanovení činitele zvukové pohltivosti $\alpha$ .....	41
6.5.	Stanovení dynamické tuhosti .....	43
6.6.	Stanovení reakce na oheň – zkouška malým zdrojem plamenem .....	44
<b>7.</b>	<b>Výsledky zkoušek .....</b>	<b>45</b>
7.1.	Stanovení zrnitosti – síťový rozbor .....	45
7.2.	Stanovení sypné hmotnosti .....	47
7.3.	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	48
7.4.	Stanovení činitele zvukové pohltivosti .....	51
7.5.	Stanovení dynamické tuhosti .....	52
7.6.	Stanovení reakce na oheň – zkouška malým zdrojem plamenem .....	53
<b>8.</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>56</b>
<b>9.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>57</b>
<b>10.</b>	<b>Použité zdroje: .....</b>	<b>58</b>



# I. ÚVOD

V dnešní době se více než kdy dříve řeší dopad výroby stavebních materiálů na životní prostředí. V souvislosti s Pařížskou dohodou o změně klimatu [1] navazující na Kjótský protokol [2] jsou kladeny stále vyšší požadavky na snižování emisí při výrobě materiálů, využívání přírodních zdrojů a možnost recyklace materiálů s ukončenou životností. Snažíme se hledat různé alternativy syntetických materiálů a současně recyklovat odpad tvořený například v dřevozpracujícím průmyslu, v zemědělství nebo komunální odpad, jako je recyklovaný papír.

Jako zajímavou alternativou k přírodním neobnovitelným surovinám se z dlouhodobého hlediska jeví přírodní suroviny obnovitelné (pocházející ze zemědělství a lesnictví), ale ty jsou poslední dobou velmi cennou komoditou a využití těchto surovin při výrobě izolačních materiálů by bylo často nejen neekologické z hlediska spotřeby pohonných hmot a produkce CO<sub>2</sub> během jejich obdělávání, ale také nerentabilní. Náklady na jejich vypěstování, sklizení a následnou výrobu tepelně izolačního materiálu by se nedaly srovnávat s běžně používanými izolanty.

Nabízí se tedy možnost zpracování odpadů, které vznikají v rámci zemědělské a dřevozpracující výroby, které již dále nejsou zpracovatelné. Ovšem u přírodních organických surovin je vždy možnost nevyužitý materiál slisovat do pelet a ty následně prodat například pro spalování v kogeneračních jednotkách, případně k jinému energetickému využití. Při dnešních cenách energií může být tato možnost pro firmy produkující odpad z přírodních surovin výhodnější než prodej surovin na výrobu izolačních materiálů.

Proto je nutné nalézt vhodnou surovinu, která bude splňovat podmínky pro použití jako tepelně izolační materiál a současně bude její využití ekonomicky výhodné jak pro výrobu izolantu, který bude konkurence schopný, tak pro firmu, která bude danou surovinu prodávat.

Tato práce se zabývá vývojem ekologické foukané izolace, která bude sloužit jako tepelná a akustická izolace především v oblasti dřevostaveb. Vyvíjená izolace by měla napomoci v oblasti dřevostaveb ke splnění požadavků v oblasti vzduchové neprůzvučnosti dle požadavků vyhlášky 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby [3] a související ČSN 73 0532 [4] tam, kde je to konstrukčně obtížnější dosahovat (např. v oblasti vnitřních přiček, kde je nutné požadovanou stavební neprůzvučnost 40 dB navýšit o korekci zohledňující boční cesty, která může u dřevostaveb dosáhnout až 8 dB).

Z tohoto důvodu je snahou najít nejlepší způsob, jak modifikovat foukanou izolaci z recyklovaného papíru, abychom zvýšili jeho objemovou hmotnost a tím zlepšili jeho akustické vlastnosti. Pro tuto práci byla využita foukaná izolace na bázi

recyklovaného papíru, která byla modifikována pomocí experimentálně připravené drcené štěpky z kořenových náběhů, která je znečištěna a tudíž je i špatně zpracovatelná.

## II. TEORETICKÁ ČÁST

### 1 Tepelně technické a akustické požadavky na stavební konstrukce

Požadavky kladené na stavební konstrukce vychází především ze stavebního zákona a jeho prováděcí vyhlášky č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby [3], jak je uvedeno v § 8 - Základní požadavky, které stavba musí splňovat:

- mechanická odolnost a stabilita,
- požární bezpečnost,
- ochrana zdraví, zdravích životních podmínek a životního prostředí,
- ochrana proti hluku,
- bezpečnost při užívání,
- úspora energie a tepelná ochrana. [3]

Tyto požadavky jsou dále specifikovány v příslušných legislativních předpisech a technických normách. Pro účely této práce jsou významné především dvě normy a to jsou ČSN 73 0540 – Tepelná ochrana budov [5][6] a ČSN 73 0532 – Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních konstrukcí a výrobků - Požadavky. [4]

Pro splnění těchto požadavků kladených na stavební konstrukce se využívají tepelně izolační materiály, které ve stavebních konstrukcích zajišťují především dosažení požadovaných vlastností v oblasti tepelné ochrany, a dále také splnění požadovaných vlastností v oblasti akustiky, jak z pohledu stavební akustiky, tak i z pohledu akustiky vnitřního prostoru.

Z pohledu tepelné ochrany budov jsou na stavební konstrukce kladeny požadavky dle normy ČSN 73 0540-2 [6], která uvádí, že jednotlivé konstrukce vytápěných budov nesmí přesáhnout požadovanou hodnotu součinitele prostupu tepla  $U_N$  v prostorech s návrhovou relativní vlhkostí vzduchu do 60 %.

Součinitel prostupu tepla  $U$  je dle ČSN 73 0540-1 [5] definován jako celkové množství vyměněného tepla, které prošlo vyšetřovanou konstrukcí s tepelným odporem  $R$  v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími.

Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla jsou ve výše uvedené normě ČSN 73 0540-2 [6] dále specifikovány podle převažující návrhové vnitřní teploty  $\theta_{im}$  a druhu dané konstrukce. Například v budově s převažující návrhovou vnitřní teplotou 18 – 22 °C je pro vnitřní stěnu mezi prostory s rozdílem

teplot do 5 °C včetně požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla 2,7 W/(m<sup>2</sup>·K) a doporučená hodnota 1,8 W/(m<sup>2</sup>·K) a pro vnější stěnu je požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla 0,30 W/(m<sup>2</sup>·K) a doporučená hodnota se dělí podle typu konstrukce. Pro těžké konstrukce je doporučená hodnota součinitele prostupu tepla 0,25 W/(m<sup>2</sup>·K) a pro lehké konstrukce 0,20 W/(m<sup>2</sup>·K).

Normové, charakteristické a návrhové hodnoty tepelných a vlhkostních vlastností vybraných stavebních materiálů jsou uvedeny příloze A normy ČSN 73 0540 – 3. [7]

Ochrana proti hluku a vibracím patří mezi základní požadavky kladené na stavby dle § 8 a jsou předmětem § 14 vyhlášky č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby [3], podle které musí konstrukce splňovat požadavky stavební akustiky na vzduchovou neprůzvučnost, u stropní konstrukce na vzduchovou i kročejovou neprůzvučnost, mezi místnostmi v budovách danou normovými hodnotami dle charakteru užívaných místností nebo navrhovaného způsobu užívaných místností.

Konkrétní požadavky jsou blíže specifikovány v příslušné technické normě ČSN 73 0532 [4], kde jsou požadavky na zvukovou izolaci rozděleny podle využití budovy, zdroje zvuku a druhu konstrukce. Například pro zvukovou izolaci mezi místnostmi v domech s byty, kdy zdroj zvuku pochází z obytné místnosti jsou na stěny kladeny požadavky na minimální stavební neprůzvučnost 40 dB. U stropních konstrukcí je za daných podmínek požadována minimální stavební neprůzvučnost 47 dB a maximální vážená normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku 58 dB. Tyto hodnoty se navyšují o korekci zohledňující boční cesty.

Ochranou proti hluku se zabývá zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů [8], který definuje hluk jako zvuk, který může poškozovat zdraví a vibrace jsou definovány jako mechanické kmitání přenášené pevnými tělesy na lidské tělo, které může poškozovat zdraví. Imisní hygienické limit hluku a vibrací jsou stanoveny prováděcím právním předpisem, kterým je nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. [9] Zde je hluk specifikován ekvivalentní hladinou akustického tlaku  $A L_{Aeq,T}$  a maximální hladinou akustického tlaku  $A L_{Amax}$  v závislosti na druhu prostor, zdroje hluku a denní hodiny. Například pro vnitřní chráněné prostory staveb je pro hluk šířený ze zdroje uvnitř objektu stanoven maximální limit hladiny akustického tlaku 40 dB, který se u obytných místností navýší o korekci -10 dB v době mezi 22.00 a 6.00 hodinou.

Pro splnění tepelně technických a akustických požadavků na stavební konstrukce se používají tepelně izolační materiály, které jsou blíže specifikovány v následující kapitole.

## 2 Tepelně izolační materiály

Tepelně izolační materiál je dle ČSN EN ISO 9229 Tepelné izolace – Terminologie [10] a ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie [5] definován, jako materiál, který značně omezuje šíření tepla a jeho nejvyšší přípustná hodnota součinitele tepelné vodivosti je  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a současně jsou jeho izolační vlastnosti závislé na chemickém složení a/nebo fyzikální struktuře hmoty.

Tepelně izolační materiály se ve stavebnictví využívají k zamezení přestupu tepla z prostředí o vyšší teplotě do prostředí o nižší teplotě a tím napomáhají ke snížení spotřeby energií na vytápění a ochlazování vnitřních prostor budov. Kvalitní tepelná izolace může ušetřit asi 65 % spotřeby energie v domácnostech. [11]

Tepelně izolační materiály se vyznačují nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, s čímž úzce souvisí i jejich nízká objemová hmotnost, která je u většiny tepelných izolací nižší než  $200 \text{ kg}/\text{m}^3$  [12] Nízká objemová hmotnost je způsobena vysokou pórovitostí (otevřenou nebo uzavřenou). V pórech izolačních materiálů nebo mezi jednotlivými vlákny, pokud se jedná o vláknité tepelně izolační materiály, je přítomen vzduch, který má významný vliv na tepelně izolační a akustické vlastnosti daného materiálu. Součinitel tepelné vodivosti vzduchu je při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  roven hodnotě  $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . [13]

### 2.1 Klíčové vlastnosti a požadavky

Pro tepelně izolační materiály jsou s ohledem na jejich využití významné obzvláště následující vlastnosti:

- tepelná vodivost,
- tloušťka (délka a šířka),
- objemová hmotnost,
- nasákavost při (částečném) ponoření,
- pevnost v tahu kolmo k rovině desky,
- napětí při 10% deformaci,
- pevnost a modul pružnosti ve smyku,
- rovinnost,
- činitel zvukové pohltivosti,
- dynamická tuhost,
- faktor difuzního odporu,
- dotvarování tlakem,
- rozměrová stabilita za daných teplotních a vlhkostních podmínek. [12]

Z pohledu využití izolačního materiálu ve stavebních konstrukcích jsou nejdůležitější vlastnosti tepelně izolační a akustické.

### 2.1.1 Tepelně izolační vlastnosti

Tepelně izolační materiál je charakterizován především **tepelnou vodivostí**. Jejím vyjádřením je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , což je dle ČSN 73 0540-1 [5] schopnost materiálu vést teplo. Můžeme jej také definovat jako množství tepla, které za jednotku času projde materiálem o jednotkové tloušťce při jednotkovém tepelném spádu. Se snižující se hodnotou součinitele tepelné vodivosti, se zlepšují i tepelně izolační vlastnosti daného materiálu. Hodnota součinitele tepelné vodivosti se určuje dle ČSN EN 12667 [14], která odpovídá jednotlivým zkušební metodám podle ISO 8301 [15] a ISO 8302 [16]. [5]

Hodnotu součinitele tepelné vodivosti ovlivňuje kromě objemové hmotnosti materiálu také pórovitost, vlhkost, směr tepelného toku neizotropních látek, chemické složení a teplota. [13]

Další důležitou vlastností je **měrná tepelná kapacita**. Tepelná kapacita materiálu je důležitá z důvodu tepelně akumulárních vlastností konstrukce. Udává, jaké množství tepla musíme předat 1 kilogramu materiálu, abychom ho zahřáli o 1 Kelvin. Závisí na obsahu vlhkosti v hmotě a její teplotě, během dodávání tepla. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje i hodnota měrné tepelné kapacity. Měrná tepelná kapacita se stanovuje například dle ČSN 72 1105 [17] kalorimetrickou metodou.

### 2.1.2 Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti stavebních konstrukcí jsou specifikovány vzduchovou a kročejovou neprůzvučností. **Vzduchová neprůzvučnost** je schopnost konstrukce zeslabit míru přenášené zvukové energie přenášející se vzduchem. Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost udává norma ČSN 73 0532. [4]

**Kročejová neprůzvučnost** popisuje schopnost stavební konstrukce zeslabit míru zvukové energie přenášející se vibracemi mezi místnostmi. Kročejový hluk je způsoben mechanickým narážením na stavební konstrukci, který vyvolá vibrace konstrukce. Jeho vyjádření je pomocí hladiny akustického tlaku v přijímací místnosti. Požadavky na kročejovou neprůzvučnost udává norma ČSN 73 0532. [4]

Z pohledu izolačních materiálů je klíčová především hodnota zvukové pohltivosti, která předurčuje možnost využití izolačního materiálu ve stavebních konstrukcích z pohledu vzduchové neprůzvučnosti, a dále dynamická tuhost, která předurčuje využití izolantu v konstrukcích z pohledu kročejové neprůzvučnosti.

**Zvuková pohltivost** je velmi důležitá vlastnost akustických izolantů především v oblasti vzduchové neprůzvučnosti. Představuje schopnost materiálu absorbovat dopadající zvukové vlny. Pohlčený zvuk se může číselně vyjádřit jako činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  [-]. Hodnota činitele zvukové pohltivosti je definována jako podíl zvukové energie pohlčené a celkové energie, která dopadá na posuzovanou konstrukci. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 0 – 1, kde  $\alpha = 0$  představuje úplný odraz a  $\alpha = 1$  je naopak úplná absorpce a je odvislá od druhu materiálu, kmitočtu a úhlu dopadu vlny. [54]

**Dynamická tuhost** materiálu určuje jeho schopnost utlumovat vznikající mechanické kmity. Je to poměr dynamické síly k dynamické výchylce a vztahuje se na jednotku plochy. Dynamická tuhost je důležitá především v oblasti kročejové neprůzvučnosti. Stanovuje se rezonanční metodou dle ČSN ISO 9052-1 Stanovení dynamické tuhosti – Část 1: Materiály pro izolaci plovoucích podlah v bytových objektech. [18] Čím je hodnota dynamické tuhosti nižší, tím má materiál lepší akusticko izolační vlastnosti.

## 2.2 Dělení tepelně izolačních materiálů

Tepelně izolační materiály lze dělit několika způsoby. Dle druhu základní hmoty se tepelné izolace a ostatně i všechny suroviny dělí na organické a anorganické. Podle struktury se rozlišují pórovité (pěnové), vláknité a zrnité tepelně izolační materiály. Lze také izolační materiály rozdělit podle toho, zda obsahují, či neobsahují pojivo, nebo dělit podle reakce na oheň do tříd (A1, A2, B, C, D, E, F) Nejčastější varianty rozdělení tepelně izolačních materiálů jsou však rozdělení dle výrobního materiálu, použití výrobku nebo podle tvaru výrobku. Tato rozdělení více rozebrána v následujících textech. [19]

Podle materiálu, z kterého je výrobek vytvořen se tepelně izolační materiály dělí do skupin na:

- pěnoplastické látky – pěnový polystyren, extrudovaný polystyren, pěnový polyuretan a polyethylen, pěnění pryskyřice a pěnění PVC,
- vláknité materiály – skleněná, minerální, syntetická vlákna a izolace na bázi ovčí vlny,
- pěnění silikáty – pěnové sklo,
- minerální materiály – expandovaný perlit a vermikulit, keramzit a strusková pemza,
- materiály na bázi dřeva a přírodních vláken – piliny a mineralizované hobliny, dřevovláknité a dřevotřískové desky, sláma, rákos, korek a korkové desky,

- materiály na bázi celulózových vláken – drcený mineralizovaný papír,
- materiály nové generace – kalciumsilikáty a vakuové izolace. [20]

Podle použití izolace ve stavební konstrukci se tepelně izolační materiály dělí na:

- vnější izolace obvodového pláště,
- izolace střešního pláště,
- vnitřní vodorovné a svislé konstrukce,
- vnitřní izolace obvodového pláště,
- speciální aplikace. [19]

Podle tvaru výrobku lze tepelné izolace rozdělit na:

- Deskové izolace – jednotlivé izolanty jsou vymezeny stálými výrobními rozměry (délkou, šířkou a tloušťkou). Deskovou izolací je například pěnový či extrudovaný polystyren.
- Izolační rohože – jejich stálý výrobní rozměr je definován pouze šířkou a tloušťkou a na stavbu jsou dodávány v rolích. Příkladem izolační rohože je minerální či skelná vlna.
- Sypané izolace – nemají stálý výrobní rozměr, neboť je tvoří jednotlivé částice izolantu. Lze je využít pro vyplnění dutin konstrukcí, nebo je lze přimíchat do betonové směsi, abychom zlepšili tepelně izolační vlastnosti výsledného betonu. Sypanou izolací je například perlit nebo sypaný polystyren.
- Stříkané izolace – nejsou definovány rozměrem, neboť jsou stříkáací pistolí aplikovány přímo na zateplování podklad, kde díky chemické reakci dojde k vývinu izolační pěny. Nejčastějším příkladem je stříkaná polyuretanová pěna.
- Foukané izolace – nejsou specifikovány rozměrem, nýbrž jsou definovány požadovanou objemovou hmotností při aplikaci objemovým plněním do dutin, či tloušťkou vrstvy při volném foukání. Nejčastěji používanou foukanou izolací jsou foukaná celulózová, či dřevěná vlákna. [21]

Foukaným izolacím se bude podrobněji věnovat následující kapitola.

### 3 Foukané izolace

Foukanou izolací je dle ČSN EN 15101-1+A1 [22] a European Assessment Document EAD-040138-01-1201 [23] stavební výrobek tvořený sypkými částicemi nebo volnými vlákny, s pojivem a nebo bez pojiva, dodávaný in-situ ve formě sypkého materiálu pro manuální nebo mechanickou instalaci.

Aplikace se provádí volným foukáním do otevřeného prostoru, nebo objemovým plněním do dutin, které může být prováděno přímo na stavbě, nebo již při výrobě rámových konstrukcí, kdy může být foukaná izolace plněna do dutin rámových konstrukcí, které se následně zaklopí a již jako hotová konstrukce se dopraví na stavbu.

#### 3.1 Vlastnosti a požadavky na foukané izolace

Pro všechna použití obecně platí dle ČSN EN 15101-1+A1 [22], že musí být splněny požadavky v oblasti:

- tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti,
- sedání,
- reakce na oheň,
- trvanlivosti,
  - stálost reakce na oheň při stárnutí či degradaci,
  - stálost tepelného odporu při stárnutí či degradaci.

Pro specifická použití musí být dále splněny požadavky na:

- krátkodobou nasákavost,
  - faktor difuzního odporu,
  - uvolňování nebezpečných látek,
  - odolnost proti korozi,
  - odolnost proti plísním,
  - odolnost proti proudění vzduchu,
  - souvislé doutnání,
  - zvukovou pohltivost,
  - reakci na oheň výrobků v běžných sestavách představujících konečné použití.
- [22]

Pokud ověřujeme vlastnosti výrobku, pro který neexistuje konkrétní technická výrobová norma, jakou je například ČSN EN 15101-1+A1 Tepelně izolační výrobky pro budovy – Výrobky z volně sypané celulózy (LFCI) vyráběné in-situ – Část 1: Specifikace pro výrobky před zabudováním [22], je možné využít při uvádění výrobků



na trh postupy dle European Assessment Document například EAD-040138-01-1201 [23] pokud se jedná o izolaci z rostlinných vláken nebo EAD-040456-00-1201 [24] v případe živočišných vláken.

## 3.2 Druhy foukaných izolací

### 3.2.1 Foukaný polystyren

Izolace z grafitového foukaného polystyrenu je tvořena buňkami polystyrenu se stopovou přísadou grafitu. Je vyráběn bez přídavku freonů, které negativně působí na ozonovou vrstvu zemské atmosféry. Zvýšení požární odolnosti napomáhá retardér hoření, díky kterému je polystyren samozhášivý. Izolace z foukaného polystyrenu odolná proti hmyzu a škůdcům, nepodléhá plísním ani hnilobě a nesesedá. Foukaný polystyren je nenasákavý a díky tomu ho lze kromě běžného použití s výhodou použít i ve vlhkostně namáhaném prostředí. Příkladem izolace z foukaného polystyrenu je CLIMASTYREN, jehož technické parametry jsou uvedeny v tabulce č. 1. [25]

*Tabulka 1 : Technické parametry izolace na bázi foukaného polystyrenu  
CLIMASTYREN [25]*

Parametry	Hodnota	Jednotka
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$	0,034	W/(m·K)
Objemová hmotnost	11 – 18*	kg/m <sup>3</sup>
Reakce na oheň	E**	-
Index šíření plamene $i_s$	0,00	mm/min
Maximální teplota použití	70	°C
Faktor difuzního odporu $\mu$	2 - 5	-
Zrnitost jednotlivých čóček	4 - 8	mm

\* Objemová hmotnost je pouze orientační a je určena především pro potřeby statiky a výpočtu požárního zatížení

\*\* Pro požární bezpečnost staveb je rozhodující zatřídění celých konstrukcí a systémů, EPS se nepoužívá bez nehořlavých krycích vrstev



*Obrázek 1: Foukaná izolace na bázi polystyrenu [26]*

### 3.2.2 Izolace z minerální vlny

Izolace z minerální vlny se vytváří rozvlákněním taveniny směsi hornin (například čediče a strusky) s přídavkem přísad a příměsí. Izolace z minerální vlny je hygienicky nezávadná, nepodléhá plísním a hnilobě a je odolná vůči dřevokazným škůdcům, hlodavcům a hmyzu. Díky dobré reakci na oheň je kromě běžného využití vhodná také pro konstrukce oddělovací požární úseky a protipožární stěny. Aplikace se provádí za sucha pomocí strojního zařízení. Při aplikaci volným foukáním se tloušťka vrstvy pohybuje v rozmezí 6 – 60 cm. Objemová hmotnost závisí na technologii ukládání a požadavcích na tepelnou vodivost. Izolace z minerální vlny je například izolace CLIMASTONE – S, jejíž konkrétní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 2. [27]

Tabulka 2: Technické parametry foukané izolace na bázi minerální vlny  
CLIMASTONE – S [27]

Parametry	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (dle objemové hmotnosti)	0,041 - 0,036	W/(m·K)
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$	0,037	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita $c_d$	900	J/(kg·K)
Objemová hmotnost	50 - 69 (70 - 90)*	kg/m <sup>3</sup>
Slehnutí materiálu (volné foukání na vodorovnou plochu)	S2 (S1)**	-
Slehnutí materiálu (objemové plnění - střechy, stropy, příčky)	neměřitelné ( $\leq 1$ )	%
Reakce na oheň	A1	-
Index šíření plamene $i_s$	0,00	mm/min
Maximální teplota použití	200	°C
Teplota tání minerálního vlákna	1000	°C
Faktor difuzního odporu $\mu$	1	-

\* dle typu konstrukce

\*\* izolace splňuje požadavek na sesedání S1 pouze při vyšších objemových hmotnostech



Obrázek 2: Foukaná izolace na bázi minerální vlny [28]

### 3.2.3 Izolace ze skelné vlny

Izolace ze skelné vlny se vyrábí rozvlákněním taveniny recyklovaného skla, které tvoří cca 80 % a dalších přísad. Izolace ze skelné vlny má nízkou objemovou hmotnost, vysokou požární odolnost a nízký difusní. Lze ji aplikovat v libovolných tloušťkách v rozmezí 6 – 60 cm. Izolace ze skelné vlny je zdravotně nezávadná a nepodléhá plísním ani hnilobě. Elastické vlákno navíc pohlcuje hluk. Příkladem konkrétní foukané izolace na bázi skelné vlny je CLIMAGLASS – W, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3. [29]

Tabulka 3: Technické parametry foukané izolace na bázi skelné vlny  
CLIMAGLASS – W [29]

Parametry	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (dle objemové hmotnosti)	0,032 - 0,041	W/(m·K)
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$ (12 - 45 kg/m <sup>3</sup> )	0,039	W/(m·K)
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$ (18 - 45 kg/m <sup>3</sup> )	0,036	W/(m·K)
Deklarovaný součinitel tepelné vodivosti $\lambda_D$ (28 - 50 kg/m <sup>3</sup> )	0,034	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita	840	J/(kg·K)
Objemová hmotnost	14 – 50*	kg/m <sup>3</sup>
Slehnutí materiálu (volné foukání na vodorovnou plochu)	S3**	%
Slehnutí materiálu (objemové plnění - střechy, stropy, příčky)	S1***	%
Reakce na oheň	A1	-
Index šíření plamene $i_s$	0,00	mm/min
Maximální teplota použití	200	°C
Bod tání	<600	°C
Faktor difuzního odporu $\mu$	1	-

\* po aplikaci dle typu konstrukce

\*\* S3 - (>5 %) a (≤ 10 %) dle ČSN EN 14064-1 [31] platí pro objemovou hmotnost 14 - 28 kg/m<sup>3</sup>

\*\*\* S1 - sesednutí není měřitelné (≤1 %) dle ČSN EN 14064-1 [31] platí pro objemovou hmotnost nad 28 kg/m<sup>3</sup>



Obrázek 3: Foukaná izolace na bázi skelné vlny [30]

### 3.2.4 Dřevovláknitá izolace

Dřevovláknitá izolace je tvořena čistými volnými dřevěnými vlákny. Výroba spočívá v rozvláknění dřeva a přidání přísady fosfátu amonného a kyseliny borité pro ochranu proti plísním a škůdcům. Dřevovláknitá izolace je využívána jako tepelná a akustická izolace pro vnitřní i vnější konstrukce. Může být aplikována volným foukáním nebo objemovým plněním do dutin stěn, střech a stropů. Příkladem dřevovláknité izolace může být foukaná izolace CLIMAWOOD, která je tvořena převážně dřevěnými vlákny z borového dřeva [32].

Tabulka 4: Technické parametry foukané izolace CLIMAWOOD [32]

Parametry	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	0,038	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita $c_d$	2100	J/(kg·K)
Objemová hmotnost dle typu konstrukce	32 - 60	kg/m <sup>3</sup>
Reakce na oheň	E	-
Faktor difuzního odporu $\mu$	1 - 3	-



Obr. 4: Volná dřevní vlákna [32]

### 3.2.5 Celulózová izolace

Celulózová izolace je foukaná izolace tvořena přírodními celulózovými vlákny, které se získávají z výběrového recyklovaného novinového papíru. Vyrábí se suchým rozvlákněním za současné impregnace kyselinou boritou a síranem hořečnatým. Impregnace napomáhá k odolnosti vůči plísním, ohni a drobným hlodavcům. Celulózová izolace se může ukládat strojním zařízením za sucha a to volným foukáním nebo častěji objemovým plněním do dutin konstrukcí. Možná je také aplikace ve formě nástřiku. Při ukládání volným foukáním dochází k sesedání o 10 – 15 %, proto se i tloušťka ukládané vrstvy navyšuje o 10 – 15 %. Pokud je při vyplňování dutin dodržena požadovaná objemová hmotnost, pak materiál nesesedá. Jako příklad

celulózové izolace lze uvést foukanou izolaci CLIMATIZER PLUS, jejíž konkrétní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5. [33]

*Tabulka 5: Technické parametry foukané izolace CLIMATIZER PLUS [33]*

<b>Parametry</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ - při suché aplikaci	0,038	W/(m·K)
Měrná tepelná kapacita $c_d$	2020 ± 6 %	J/(kg·K)
Objemová hmotnost - aplikace volným foukáním	30 - 48	kg/m <sup>3</sup>
Objemová hmotnost - aplikace objemovým plněním	34 - 70	kg/m <sup>3</sup>
Reakce na oheň – suchý materiál	C-s1, d0	-
Reakce na oheň – suchý materiál v dutině za stanovených podmínek	B-s1, d0	-
Index šíření plamene $i_s$	0,00	mm/min
Maximální teplota použití	80 (105 krátkodobě)	°C
Faktor difuzního odporu $\mu$	1,1 - 3	-



*Obrázek 5: Foukaná celulózová izolace [34]*

### 3.2.6 Další druhy foukaných (syhkých) izolací

Pro výrobu foukaných izolací je možno využít mnoho surovin. V této kapitole jsou představeny materiály, které byly předmětem zkoumání vědeckých prací. Jedná se o syhké materiály, které by mohly být vhodné pro použití ve stavebnictví jako foukané izolace.



V minulých letech byla provedeny studie [35], kde byly zkoumány možnosti využití materiálů na bázi **rašeliny**, **mechu**, **dřevních hoblin** nebo **kuřecího peří** pro účely foukaných izolací. Výsledky studie prokázaly, že tyto materiály vykazují součinitel tepelné vodivosti v rozmezí 0,033 – 0,044 W/(m·K) při teplotě 10 °C. Nejnižší tepelnou vodivost měl materiál na bázi peří. Ve srovnání s materiálem na bázi dřevěných hoblin, který měl větší tendenci ke zvýšení tepelné vodivosti ve srovnání s ostatními zkoumanými materiály, by bylo možné snížit tloušťku izolace na bázi peří pro plášť budovy o 33 % při dosažení stejného tepelného výkonu. Tepelné vodivosti se s rostoucí teplotou zvyšovaly, kromě izolace na bázi peří, která měla nejnižší a téměř lineárně rostoucí tepelnou vodivost v celé měřené teplotní škále. Měrná tepelná kapacita se pohybovala v rozmezí 1285 – 1404 J/(kg·K). Nejnižší naměřená tepelná kapacita byla získána u izolace na bázi dřevěných hoblin a naopak nejvyšší hodnotu vykazovala izolace na bázi rašeliny. Faktor difúzního odporu vodní páry se pohyboval v rozmezí 2,3 – 3,9, což svědčí o vysoké propustnosti materiálů. [35]



Obrázek 6: Foukaná izolace na bázi rašeliny [35]



Obrázek 6: Foukaná izolace na bázi mechu [35]



Obrázek 8: Foukaná izolace na bázi dřevěných hoblin [35]



Obrázek 7: Foukaná izolace na bázi kuřecího peří [35]

Ve studii [36] prováděné na Národním institutu aplikovaných věd v Lyonu byla zkoumána tepelná vodivost volně loženého **konopí** jako výplňového materiálu do podlah a stěn. Byly zkoušeny dva vzorky s různými objemovými hmotnostmi, přičemž pro objemovou hmotnost  $110 \text{ kg/m}^3$  vyšel součinitel tepelné vodivosti  $0,048 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  a pro objemovou hmotnost  $155 \text{ kg/m}^3$  byla naměřena hodnota  $0,058 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . [36]



*Obrázek 8: Volně ložené konopí [36]*

Na Pařížské univerzitě byla provedena studie [37], během které byl zkoumán termofyzikální charakter **mořských vláken Posidonia Oceanica** určených k použití jako izolační materiál pro středomořské budovy. Vlákna o délce asi 5 mm, použitá v této studii, jsou mechanicky extrahována z kuliček *Posidonia Oceanica*, uvedených na obrázku č. 12a). Tyto kuličky jsou promyty a sušeny za normálních podmínek (při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  a vlhkosti  $60 \% \pm 5 \%$ ). Poté byly vytvořeny 4 vzorky, kdy jeden zůstal neupravený a tři vzorky se za různých podmínek namáčeli do roztoku hydroxidu sodného. První úprava  $T_1$  spočívá v ponoření vláken ve 2% roztoku NaOH po dobu 2 hodin při  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Druhý  $T_2$  se prováděl za použití 0,75% roztoku NaOH po dobu 1 hodiny při  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Poslední úprava  $T_3$  spočívá v opakování prvního ošetření vláken  $T_1$  na již ošetřených vláknech stejným způsobem. Bylo provedeno 20 měření tepelné vodivosti při různých objemových hmotnostech. Z výsledků měření se ukázalo, že tepelná vodivost vláken *Posidonia Oceanica* se pohybuje v rozmezí  $0,043 - 0,070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Nejnižší součinitel tepelné vodivosti  $0,043 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  vychází nejnižší pro vzorky s objemovou hmotností  $27 \text{ kg/m}^3$  pro neupravená vlákna a vlákna s úpravou  $T_3$ . [37]



Obrázek 10: a) Kuličky *Posidonia Oceanica*; b) Extrahovaná mořská vlákna [37]

V Saúdské Arábii byl proveden výzkum [38] využití suchých **listů Eucalyptus Globulus** jako tepelně izolačního a zvuk pohlcujícího materiálu pro budovy v subtropických oblastech, kde tvoří tyto listy velké množství odpadu. Bylo zkoumáno osm vzorků. Samostatné, volně ložené listy Eucalyptus Globulus a volná vlákna pšeničné slámy a dále jejich kombinace v různých poměrech za použití roztoku kukuřičného škrobu, jako pojiva. Z výsledků bylo zjištěno, že součinitel tepelné vodivosti se pro samostatné listy Eucalyptus Globulus pohyboval v rozmezí 0,045 – 0,055 W/(m·K), co bylo nejlepší naměřené rozmezí ze všech zkoušených vzorků. Výzkum také prokázal, že listy jsou stabilní až do teploty 212 °C. Většina vzorků vykazovala dobré chování při pohlcování více než 60 % zvuku ve frekvenčním rozsahu 500–1600 Hz. [38]



Obrázek 9: Listy *Eucalyptus Globulus* [38]



### 3.3 Suroviny pro výrobu foukaných izolací

Foukané izolace mohou být vyráběny z umělých i přírodních surovin. Umělé suroviny jsou buď chemické, získané z přírodních polymerů chemickou cestou, nebo syntetické, vyrobené ze syntetických polymerů. Přírodní suroviny mohou být rostlinného, či živočišného původu. [39] V rámci bakalářské práce je však snaha nalézt vhodnou přírodní surovinu pro ekologické foukané izolace, z toho důvodu jsou v následující kapitole blíže popsány pouze přírodní suroviny.

#### 3.3.1 Přírodní organické (obnovitelné) suroviny

Díky svému organickému charakteru a vysoké pórovitosti má většina organických obnovitelných surovin nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti, proto se tyto suroviny, jako první začaly využívat jako tepelné izolanty při zateplování staveb (sláma, seno, dřevo, atd.)

Přírodní materiály obvykle vykazují vyšší měrnou tepelnou kapacitu a umožňují lepší difúzi vzdušné vlhkosti než některé konvenční materiály (např. EPS, XPS). Dovedou při zvýšené vlhkosti vzduchu absorbovat vlhkost do vnitřního porézního systému, a naopak při nižší vlhkosti vzduchu postupně uvolňují vlhkost do okolí. Přírodní materiály mají dobré akusticko-izolační vlastnosti, které se odvíjejí od jejich vysoké pórovitosti. Každá surovina však může být odlišně strukturovaná, od čehož se odvíjí, že i jejich vlastnosti se mohou lišit. [40]

Je-li materiál dlouhodobě vystaven vysoké vlhkosti nebo je přímo v kontaktu s kapalnou vodou, můžou nastat problémy s výskytem plísní, hub a bakterií. Je proto vhodné organický přírodní materiál zabudovaný v konstrukci chránit před zdroji vlhkosti, případně zajistit rychlé vyschnutí, abychom předešli degradaci organického materiálu. [40]

Vlhkost negativně působí na tepelně izolační vlastnosti přírodních tepelně izolačních materiálů. Vysoká otevřená pórovitost má podstatný vliv na tepelné a vlhkostní chování přírodních izolačních materiálů. Ve vlhkém materiálu je součinitel tepelné vodivosti vymezen vodivostí nejen samotného materiálu a vzduchem obsaženým v pórech, ale také absorbovanou kapalinou. S rostoucí vlhkostí materiálu roste i jeho součinitel tepelné vodivosti. [40]

Přírodní organické suroviny lze rozdělit na:

- suroviny na bázi dřevin – dřevo, korek,
- suroviny na bázi lýkových vláken – len, konopí, juta, kenaf, sláma, seno...,
- suroviny z listů rostlin – sisal...,
- suroviny ze semen – kapok, bavlna...,

- suroviny z plodů rostlin – kokos...,
- živočišná/keratinová vlákna – ovčí vlna,
- suroviny na bázi druhotných surovin – např. rozvlákněný papír. [41]

V následující tabulce č. 3 jsou uvedeny délky a tloušťky jednotlivých vláken vybraných organických surovin.

*Tabulka 6: Druhy vláken a jejich rozměry [41]*

<b>Druh vlákna</b>	<b>Tloušťka vlákna [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Délka vlákna [cm]</b>
Bavlna	10 - 35	1,2 - 5,5
Len	15 - 18 (elementární)	2,5 - 3 (elementární)
	až 600 (technické)	60 -80 (technické)
Konopí	15 - 50 (elementární)	1,5 - 2 (elementární)
	až 600 (technické)	100 - 200 (technické)
Kenaf	20 (elementární)	0,25 (elementární)
		až 200 (technické)
Sisal	17 - 50 (elementární)	6 - 10
	50 - 200 (technické)	
Juta	18 - 25 (elementární)	0,1 - 0,5 (elementární)
	25 - 200 (technické)	150 - 400 (technické)
Ananas	20 - 80	5 - 10
Kokos	10 - 20 (elementární)	0,1 (elementární)
	50 - 450 (technické)	10 - 30 (technické)
Ovčí vlna	10 - 40	5 - 40
Hedvábí	4	30000 - 90000

### 3.3.2 Přírodní suroviny rostlinného původu

Přírodní suroviny jsou získávány z různých částí rostlin jako hlavní či vedlejší produkt jejich růstu. Surovinou, kterou z rostlin získáváme pro výrobu stavebních materiálů jsou především vlákna. Ty se mohou získávat ze semen (bavlny, kokosu či kapoku), lodyh (lnu, konopí, juty, ramie, kenafu nebo kopřiv) a také z listů (konopí, agáve, ananasu, eukalyptu, novozélandského lnu, sisal, aloe či rašelina). Rostlinná vlákna jsou tvořena převážně celulózu, která tvoří buněčné stěny rostlinných buněk. Následuje výčet vybraných surovin rostlinného původu. [36]

#### 3.3.2.1 Bavlna

Bavlna se získává z rostliny bavlníku, nejčastěji se jedná o bylinný bavlník *Gossypium hebraceum*. Vlákna získaná z bavlny jsou velmi významná, díky vysokému obsahu celulózy, který může být i více než 94 %. Tobolky vyvíjející se z velkých květů obsahují semena, která jsou kryta bílými chlupy bavlněných vláken, která mohou dosahovat délky 20 – 60 mm. Během pěstování je pro ochranu bavlníku nutné používat

herbicidey. Bavlna se napouští boraxem, aby se zlepšila její odolnost proti ohni, plísním a hlodavcům. Bavlna má dobré izolační vlastnosti, díky čemuž je využitelná i k zateplení budov ve formě rohoží, pletenců, či těsnící vaty. Může se použít k izolaci stěn a šikmých střech při tloušťce 50 – 120 mm nebo jako volně ložená izolace. Bavlna je odolná vůči hlodavcům, reguluje vlhkost v prostředí, ve kterém je umístěna, je samozhášivá a odolává ohni až do 400 °C. [42]

### 3.3.2.2 Len

Len setý (*Linum usitatissimum* L.) je jednoletá užitková rostlina. Stonek dlouhý až 600 mm je jednoduchý a na konci rozvětvený s vrcholovými modrými květy. Pro pěstování lnu je ideální chladnější podnebí s dostatkem srážek a dostatečnou hloubkou ornice. [43]

Struktura lnu je tvořena 500 až 900 mm dlouhými svazky. Každý svazek se dále skládá z vláken dlouhých 20 až 50 mm. Při sklizni lnu dochází k jeho mechanickému lámání a následně k oddělení dlouhých a krátkých vláken. Pro výrobu tepelně izolačních materiálů se využívají dlouhá vlákna, která tvoří cca 14 % z celkové hmotnosti sklizně. Lněná sláma, která je používána pro stavební materiály je tvořena převážně, z více jak 50 %, celulózou. Zbytek tvoří ve stejném poměru asi 24 % lignin a hemicelulóza. [42] [44]

Len je pěstován především pro jeho vlákna a semena. Lněné vlákno je následně zpracováváno na výrobu tkanin pro šití oděvů a na izolační desky a plsti. [43]



Obrázek 11: Len setý (*Linum usitatissimum* L.) [45]

### 3.3.2.3 Konopí

Konopí seté (*Cannabis sativa* L.) se již v dřívějších dobách hojně používalo pro šití oděvů, na výrobu plachet, lan, papíru, malířských pláten nebo k léčbě různých chorob. Koncem 19. století však došlo k úpadku pěstování konopí a nahradili jej bavlna a len. [42]

Dnes se konopí pěstuje především jako alternativní plodina, která je z ekologického hlediska velmi výhodná. Z jednoho hektaru konopí můžeme získat 2,5 až 4 krát větší množství celulózy, než kdyby byl na stejné ploše vysazený les, který roste desítky let, než jej můžeme vytěžit. Oproti tomu konopí se za příznivých podmínek může sklízet i dvakrát ročně, přičemž z něj získáme čtyřikrát více vlákniny než ze dřeva. Během 4 měsíců může konopí dorůst až do výšky 4,5 m, což vydá 12 tun suchého konopí z každého hektaru. Konopné pazdeří používané ve stavebnictví je tvořeno zhruba 40 % celulózy, 25 % ligninu a 35 % hemicelulózy. [44] [42]



Obrázek 12: Konopí seté (*Cannabis sativa* L.) [46]

#### 3.3.2.4 Sláma

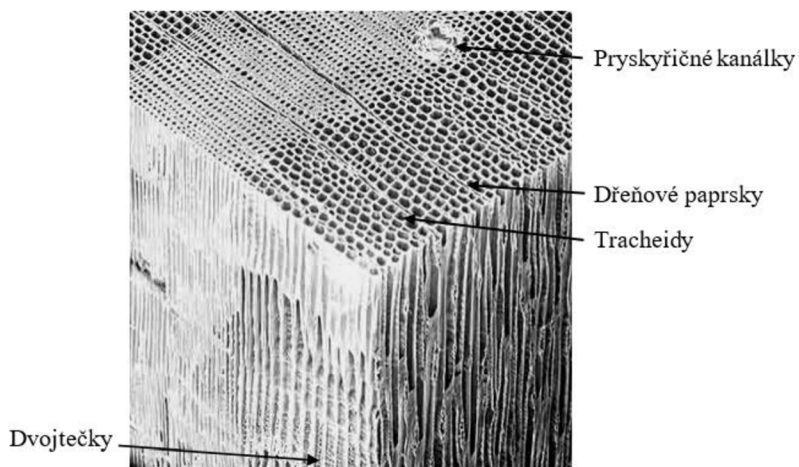
Sláma vzniká v zemědělství, jako druhotná surovina. Je tvořena vymláčenými stébly suchých obilnin, jako jsou například pšenice, žito, oves a ječmen. V České republice je ročně vyprodukováno cca 6 milionů tun slámy, z čehož 30 % je nadbytek, který se v zemědělství již nezužítuje. Již dříve se sláma používala jako stelivo, díky jehož tepelně izolačním vlastnostem byla zajištěna ochrana místností po celou zimu. [42]

#### 3.3.2.5 Dřevo

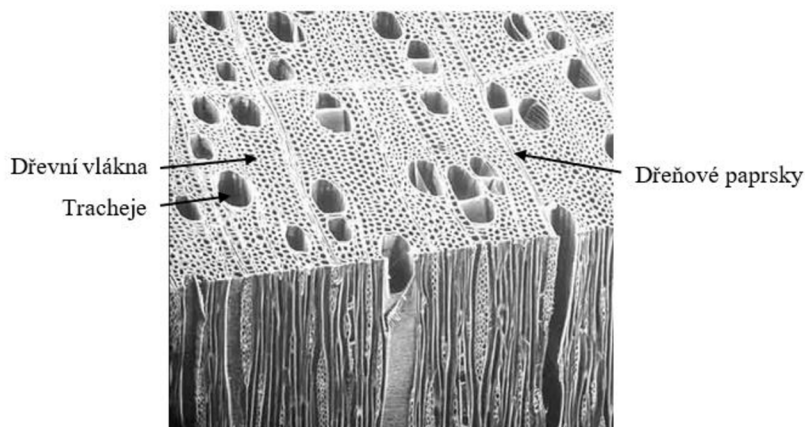
Dřevo je díky jeho všestranným vlastnostem velmi rozšířenou surovinou obzvláště ve stavebnictví. Lze jej využít ke konstrukčním a izolačním účelům, nebo jako povrchovou úpravu. Ze dřeva se vyrábí také rámy oken, dveře, nábytek, dekorační a užitkové předměty, papír nebo hudební nástroje. [47]

Mikrostruktura dřeva se odlišuje podle toho, jestli se jedná o jehličnaté nebo listnaté stromy. Jehličnaté dřeviny jsou tvořeny podélnými vlákny zvanými tracheidy

(cévice), pryskyřičnými kanálky, dřevnými paprsky a dvojtečkami. Mikrostruktura listnatých dřevin je složena z trachejí (cév), dřevních vláken a dřevných paprsků. [47]



Obrázek 14: Mikrostruktura jehličnatých dřevin [48]



Obrázek 13: Mikrostruktura listnatých dřevin [48]

Dřevo je z chemického hlediska tvořeno z 40 – 50 % celulórou, 20 – 35 % hemicelulórou a 15 – 35 % ligninem. Celulóza je nejdůležitější složkou dřeva, neboť díky ní je dřevo pevné. [48]

### 3.3.3 Přírodní suroviny živočišného původu

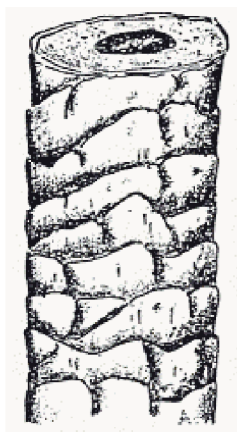
Suroviny živočišného původu jsou vlákna na bázi bílkovin. Jsou získávána ze srsti zvířat, především ovcí – ovčí vlna, nebo ze skeletu hmyzu. [49]

#### 3.3.3.1 Ovčí vlna

Ovčí vlna se získává ze srsti šlechtěných ovcí, které jsou schopny vydat 2,5 až 5 kg vlněných vláken za rok. Je využívána v textilním průmyslu, k výrobě bytového textilu a také k výrobě tepelně izolačních materiálů. Jelikož krátké vlněné vlákno není vhodné pro výrobu oděvů, je vyřazeno jako odpad. Vlna se skládá z mnoha různých aminokyselin, které tvoří dlouhé řetězce. Stočené prameny molekulárních řetězců vlny přispívají k odolnosti vláken, a napomáhají absorpci zvuku. Při frekvenci 800 – 2000 Hz je koeficient zvukové pohltivosti vlny 0,9. Dutá a zvlněná vlákna vytvářejí malé vzduchové mezery ve výsledném materiálu, které zlepšují jeho tepelně izolační vlastnosti. [42] [11]

„Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  se pohybuje v rozsahu 0,038 W/(m·K) až 0,050 W/(m·K). Ovčí vlna na sebe dokáže vázat značné množství vody, které může dosáhnout 30 % až 35 % vlastní hmotnosti, s minimálním vlivem na zhoršení tepelně izolačních vlastností. Tuto pohlcenou vlhkost potom uvolňuje v závislosti na aktuální vlhkosti interiéru a stabilizuje tak vlhkostní klima.“ [42] (CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. 1. vyd., s.116)

Jemnost vlny je dána tloušťkou vlákna, která činí 10 až 80  $\mu\text{m}$  a po délce vlákna se může měnit. Tloušťka závisí především na plemeni, výživě, věku a pohlaví ovce. V rounu se můžeme nalézt různé druhy vláken lišící se svojí jemností. Například vlákna podsadová, která nemají kanálek a jsou nejjemnější, přechodová vlákna s přerušovaným dřevným kanálkem, nebo nejhrubší pesíková vlákna s vnitřním dřevným kanálkem. [50] [51]



Obrázek 15: Pesíkové vlákno s dřevným kanálkem [51]

### 3.3.4 Přírodní suroviny uplatnitelné pro nové výrobky v rámci ČR

Na základě předešlého průzkumu bylo zjištěno, že již dříve byly zkoumány možnosti využití přírodních materiálů pro účely foukaných izolací. Ovšem materiály, jako jsou například mořská vlákna *Posidonia Oceanica*, listy eukalyptu, rašelina, mech, či konopí se v naší oblasti nenachází, nebo nejsou dostatečně rozšířeny. Kuřecí peří by mohlo být využitelné, avšak jeho použití je komplikované a nevýhodou je také nepříjemný zápach, který by nejspíše bylo zapotřebí eliminovat. Použitelnou surovinou by mohla být také ovčí vlna, jenže se zde pro ni nenachází zpracovatelský průmysl a tato surovina je v ČR poměrně drahá a špatně dostupná.

Jako nejvhodnější surovinou se tedy jeví dřevo, respektive jeho část, která je již dále nezpracovatelná. Takovou surovinou jsou například dřevní kořenové náběhy, které jsou znečištěny, a proto jsou využitelné pouze pro peletování a následné energetické zpracování, nebo jako zahradnická štěpka. Tento materiál však nemá příliš dobré tepelně izolační vlastnosti a proto se nabízí jej smíchat s recyklovaným papírem, který je běžně dostupný, jako foukaná izolace. Recyklovaný papír je již chemicky ošetřen proti růstu plísní, ohni a drobným hlodavcům, takže není nutno výsledný materiál dále chemicky ošetřovat.

Podrobněji je tento návrh vypracován v praktické části, kde jsou také ověřeny jeho klíčové vlastnosti.

### III. PRAKTICKÁ ČÁST

#### 4. Cíl práce

Cílem práce je provedení návrhu a vývoje ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin, který by měl být použitelný jako tepelná a akustická foukaná izolace pro oblast ekologických dřevostaveb. V rámci praktické části bakalářské práce je cílem provedení návrhu konkrétního složení izolantů, provedení jejich výroby a ověření klíčových vlastností za laboratorních podmínek

#### 5. Metodika práce

V rámci teoretické části práce byla provedena rešerše dostupných přírodních surovin a následně byl proveden návrh izolantu s tepelně izolačními a akustickými vlastnostmi pro oblast dřevostaveb.

Jako základní suroviny pro výsledný izolant byly zvoleny zbytky z dřevozpracujícího průmyslu, jednalo se o štěpku z kořenových náběhů, která je (vzhledem ke své heterogenitě a vysokému stupni znečištění) velice špatně dále zpracovatelná a využívá se většinou spíše k energetickému využití. Dále byl vybrán recyklovaný papír, který je volně dostupný na trhu v ČR od firem CIUR nebo Enroll a vyrábí se především recyklací komunálního odpadu.

Snahou bylo především upravit štěpku z kořenových náběhů a vhodně ji zkombinovat s komerčním izolantem na bázi recyklovaného papíru tak, aby:

- nebylo nutné upravenou štěpku dále modifikovat, protože recyklovaný papír v sobě obsahuje chemii zaručující potřebné požární vlastnosti a odolnost proti plísním,
- výsledný izolant měl lepší akustické vlastnosti, protože přidáním upravené štěpky dojde ke změně celkové struktury a zvýšení sypané hmotnosti (objemové hmotnosti),
- došlo ke zlepšení stabilizace izolantu (snížení sesedání izolantu v čase nebo při dopravě),
- došlo ke snížení ceny izolantu využitím levné druhotné suroviny v podobě upravené štěpky.

Použitá dřevní štěpka z dřevních náběhů byla ve spolupráci s MENDELU v Brně nadrcena na dvě frakce, které byly pro přehlednost označeny jako „jemná dřevní štěpka“ a „hrubá dřevní štěpka“. Obě štěpky i recyklovaný papír, který byl dodán firmou CIUR, jednalo se o standardní tepelnou izolaci (CLIMATIZER+) byly následně podrobeny síťovému rozboru.



Dalším krokem bylo stanovení sypané hmotnosti recyklovaného papíru a jemné a hrubé dřevní štěrky.

Následně bylo navrženo 6 vzorků izolantů s různým poměrem dřevní štěrky a foukané izolace z recyklovaného papíru + 3 referenční vzorky čistých surovin. Jednotlivé vzorky izolantů byly navrženy v následujících (objemových) poměrech:

- Vzorek č. 1) 50 : 50 % – hrubá dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 2) 50 : 50 % – jemná dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 3) 70 : 30 % – hrubá dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 4) 70 : 30 % – jemná dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 5) 30 : 70 % – hrubá dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 6) 30 : 70 % – jemná dřevní štěrka : recyklovaný papír
- Vzorek č. 7) 100% čistá hrubá dřevní štěrka
- Vzorek č. 8) čistá jemná dřevní štěrka
- Vzorek č. 9) čistý recyklovaný papír

Dle navržených poměrů surovin byly za laboratorních podmínek vytvořeny vzorky sypaného izolantu. Nejprve byl určen celkový objem směsi, pro který byly v daném poměru smíchány dřevní štěrky a recyklovaný papír. Dřevní štěrky byly dávkovány objemově a recyklovaný papír byl dávkován hmotnostně na základě předpokládané sypané/objemové hmotnosti v konstrukci  $50 \text{ kg/m}^3$  z objemové hmotnosti dané výrobcem. Důvodem pro tento přepočít bylo nepřesné měření sypané hmotnosti recyklovaného papíru kvůli vysokému vlivu zhutnitelnosti materiálu (materiál se dodává zhutněný a je proto komplikované ho vždy stejným způsobem rozvolnit).



*Obrázek 16: Neupravená štěrka z kořenových náběhů*



*Obrázek 17: Vzorek recyklovaného papíru*



*Obrázek 18: Vzorky upravené dřevní štěpky (vlevo jemná štěpka, vpravo hrubá štěpka)*

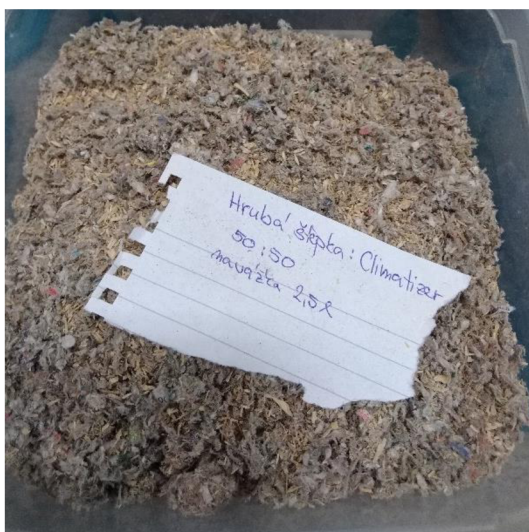
Následně byla stanovena sypná hmotnost všech vytvořených vzorků a byl stanoven součinitel tepelné vodivosti. Vzorky byly předem kondicionovány při teplotě vzduchu 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 % do ustálení hmotnosti. Měření bylo provedeno na vzorcích 1 až 9 ve volně sypaném stavu a na vzorcích jemné i hrubé štěpky ve volně sypaném i zhutněném stavu. U vzorku sypkého izolantu s nejnižším součinitelem tepelné vodivosti (vzorek č. 5) byla ověřena jeho tepelná vodivost i ve zhutněném stavu.

U všech vzorků bylo pro ověření akustických vlastností provedeno stanovení činitele zvukové pohltivosti, stanovení dynamické tuhosti a stanovení reakce na oheň.

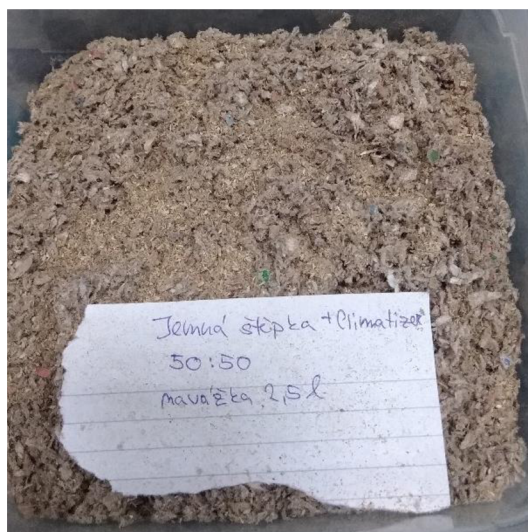
Všechny zkoušky byly vyhodnoceny a na závěr bylo provedeno vyhodnocení výsledků.



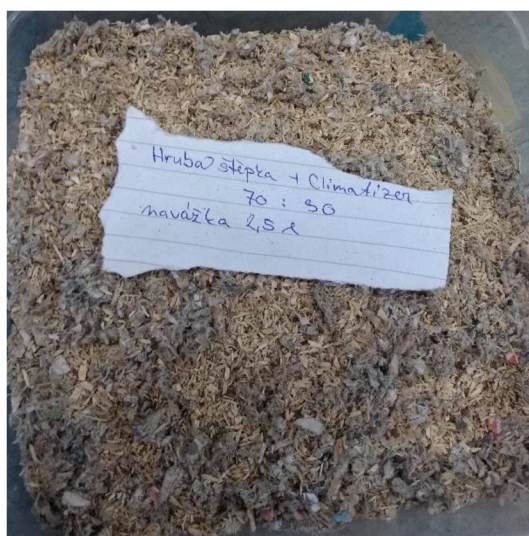
## 4 Zkušební vzorky



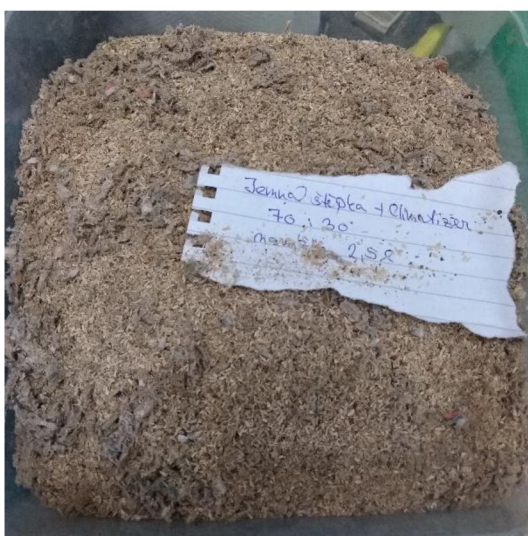
Obrázek 19: Vzorek č. 1) 50 : 50 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír



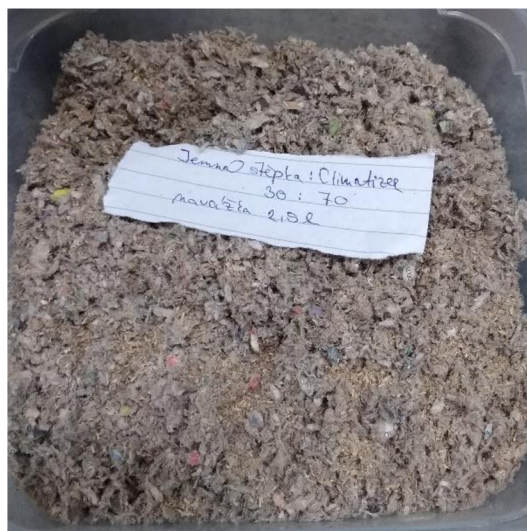
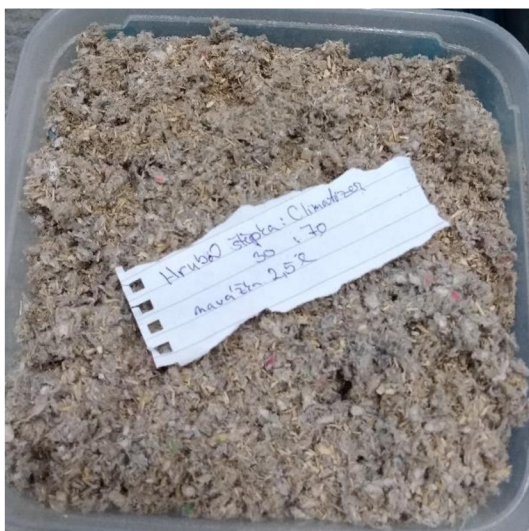
Obrázek 20: Vzorek č. 2) 50 : 50 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír



Obrázek 21: Vzorek č. 3) 70 : 30 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír



Obrázek 22: Vzorek č. 3) 70 : 30 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír



Obrázek 23: Vzorek č. 5) 30 : 70 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír      Obrázek 24: Vzorek č. 5) 30 : 70 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír

## 6. Zkušební metody

Vybrané zkoušky byly provedeny za účelem ověření klíčových tepelně izolačních, akustických a požárních vlastností vyrobených vzorků materiálů. Za tímto účelem byly provedeny zkoušky:

- Stanovení zrnitosti – síťový rozbor
- Stanovení sypné hmotnosti
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti
- Stanovení činitele zvukové pohltivosti
- Stanovení dynamické tuhosti
- Stanovení reakce na oheň

### 6.1. Stanovení zrnitosti – síťový rozbor

Stanovení zrnitosti bylo provedeno síťovým rozbohem dle ČSN EN 933-1. [52] Síťový rozbor byl proveden na řadě sít s čtvercovými otvory o velikosti 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 a 0,063 mm. Zkušební síta byla seřazena od horního síta k dolnímu sítu od největší velikosti ok po nejmenší. Navážené množství materiálu bylo vsypáno na sloupec sít pod nímž bylo umístěno dno, které zachytává jemné částice o velikosti menší než 0,063 mm. Na horní síto bylo umístěno víko a celý sloupec sít byl připevněn k vibračnímu přístroji, za pomoci kterého byl materiál proséván. Po ukončení prosévání byla postupně odebíraná síta z horní části sloupce sít a vážil se zůstatek na jednotlivých sítích a také zbytek jemných částic na dně sít.



Výsledkem měření je procentuální zůstatek materiálu na jednotlivých sítích a celkový procentuální propad sítím.



Obrázek 25: Sloupec sít

## 6.2. Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost je běžně stanovována především pro kamenivo dle ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. [53] Vzhledem k tomu, že nebyla stanovena žádná norma pro měření sypné hmotnosti sypkých materiálů, byl použit postup z výše uvedené normy pro kamenivo.

Sypná hmotnost byla stanovena zvážením prázdné odměrné nádoby a následně byla nádoba naplněna materiálem a opět zvážena.

Výpočet sypné hmotnosti pro jednotlivé navážky byl vypočítán ze vztahu:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V},$$

kde:  $\rho_b$  – sypná hmotnost ve volně sypaném stavu [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ],  
 $m_2$  – hmotnost odměrné nádoby s navážkou [kg],  
 $m_1$  – hmotnost odměrné nádoby [kg],  
 $V$  – objem odměrné nádoby [l]. [53]



*Obrázek 27: Stanovení sypné hmotnost hrubé štěpky*



*Obrázek 27: Stanovení sypné hmotnost jemné štěpky*

### 6.3. Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno ve stacionárním stavu v souladu s ČSN EN 12667 [14] dle ISO 8301 [15] na přístroji Lasercomp FOX 200 při teplotním spádu 10 K a střední teplotě + 10 °C. Před zkoušením byly vzorky kondicionovány v klimatické komoře do ustálení hmotnosti pro požadovaný tepelně vlhkostní stav. Při měření byl vzorek umístěn do plastového rámečku s tenkými stěnami a velmi tenkou spodní plochou, aby byl eliminován jeho vliv na výslednou hodnotu tepelné vodivosti.



Obrázek 28: Plastový rámeček pro stanovení součinitele tepelné vodivosti



Obrázek 29: Fotografie přístroje FOX 200

#### 6.4. Stanovení činitele zvukové pohltivosti $\alpha$

Činitel zvukové pohltivosti se stanovuje v třetinooktávových pásmech v impedanční trubici vytvořením stojatého vlnění dle ČSN ISO 10534-1: Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. [54] Na konec trubice se umístí držák se vzorkem. Na generátoru se nastaví požadovaný kmitočet a pohybem akustické sondy se určí akustický tlak v nejbližší kmitně a uzlu stojaté vlny, které se odečtou na výstupu voltmetru jako maximální a minimální napětí.

Měření bylo prováděno na měřicí soustavě s názvem Kuntova trubice pro kmitočty v rozsahu 100 – 6300 Hz, přičemž pro 100 – 1000 Hz byla použita velká Kuntova trubice a pro vyšší kmitočty malá Kuntova trubice. Vzorek byl v držáku opatřen sítkou, aby nedošlo k jeho vysypání.

Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha_N$  byl pro jednotlivé kmitočty vypočítán ze vztahu:

$$\alpha_N = \frac{4}{n + \frac{1}{n} + 2} = \frac{4 \cdot n}{(n + 1)^2},$$

kde:  $n = U_{max}/U_{min}$ ,

$U_{max}$  – napětí odpovídající kmitně akustického tlaku [mV],

$U_{min}$  – napětí odpovídající uzlu akustického tlaku [mV]. [55]



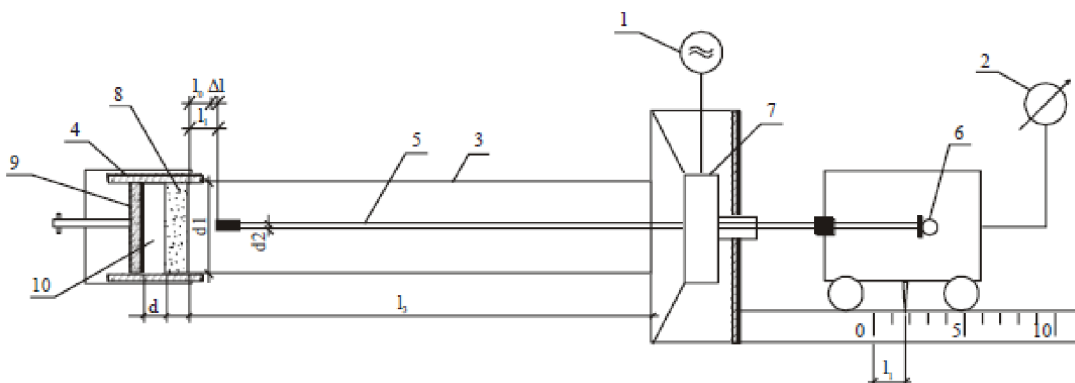
Obrázek 33: Vzorek umístěný v držáku velké Kuntovy trubice



Obrázek 31: Vzorek umístěný v držáku malé Kuntovy trubice



Obrázek 31: Držák vzorku opatřený sítkou



Obrázek 32: Schéma Kuntovy trubice: 1 – generátor, 2 – analyzátor, 3 – trubice, 4 – držák vzorku, 5 – akustická sonda, 6 – mikrofon, 7 – reproduktor, 8 – vzorek, 9 – nastavitelné dno držáku, 10 – vzduchová mezera [19]



## 6.5. Stanovení dynamické tuhosti

Dynamická tuhost se stanovuje rezonanční metodou dle ČSN ISO 9052-1 Stanovení dynamické tuhosti – Část 1: Materiály pro izolaci plovoucích podlah v bytových objektech. [18] Je založena na buzení vibrací ve svislém směru.

Vzorek byl během zkoušky umístěn do rámečku s dnem tvořeným síťkou, abychom omezili jeho vliv na výsledek zkoušky. Rámeček se vzorkem byl umístěn na betonovou základnu. Na vzorek se umístila zatěžovací deska s elektromagnetickým budičem kmitů. Nad elektromagnet se ve vzdálenosti asi 1 mm umístil zavěšený permanentní magnet, který vyvozoval buzení kmitů. Postupným zvyšováním frekvence byla nalezena maximální rezonanční frekvence odpovídající maximální výchylce na analyzátoru. Vyhodnocení zkoušky stanovené na sytkém materiálu je nutné nejprve vypočítat zdánlivou dynamickou tuhost  $s'_t$  a dynamickou tuhost vzduchu  $s'_a$ , ze vztahů:

$$s'_t = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2,$$

kde:  $s'_t$  – zdánlivá dynamická tuhost [MPa/m],  
 $m'_t$  – celková plošná hmotnost zatěžovacího tělesa [kg/m<sup>2</sup>],  
 $f_r$  – rezonanční kmitočet [Hz],

$$s'_a = \frac{111000}{d},$$

kde:  $s'_a$  – dynamická tuhost vzduchu [MPa/m],  
 $d$  – tloušťka vzorku [m],

Dynamická tuhost materiálu se středním odporem proti proudění  $s'$  [MPa/m] se následně vypočítá ze vztahu:

$$s' = s'_t + s'_a. \quad [18]$$

Zařazení materiálu do kategorie dle dynamické tuhosti se provádí na základě ČSN 73 0532 [4]

Tabulka 7: Dynamická tuhost při zatížení 2 kPa [4]

Kategorie	Dynamická tuhost $s'$ [MPa/m]
I	$\leq 30$
II	$30 \leq s' \leq 200$
III	$\geq 200$



*Obrázek 34: Zkušební zařízení pro stanovení dynamické tuhosti*



*Obrázek 35: Vzorek umístěný v rámečku pro zkoušku dynamické tuhosti*

## **6.6. Stanovení reakce na oheň – zkouška malým zdrojem plamene**

Pro stanovení reakce na oheň byla provedena zkouška malým zdrojem plamene dle normy ČSN EN ISO 11925-2: Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene [56], kdy se sledovalo chování vzorku při kontaktu s plamenem.

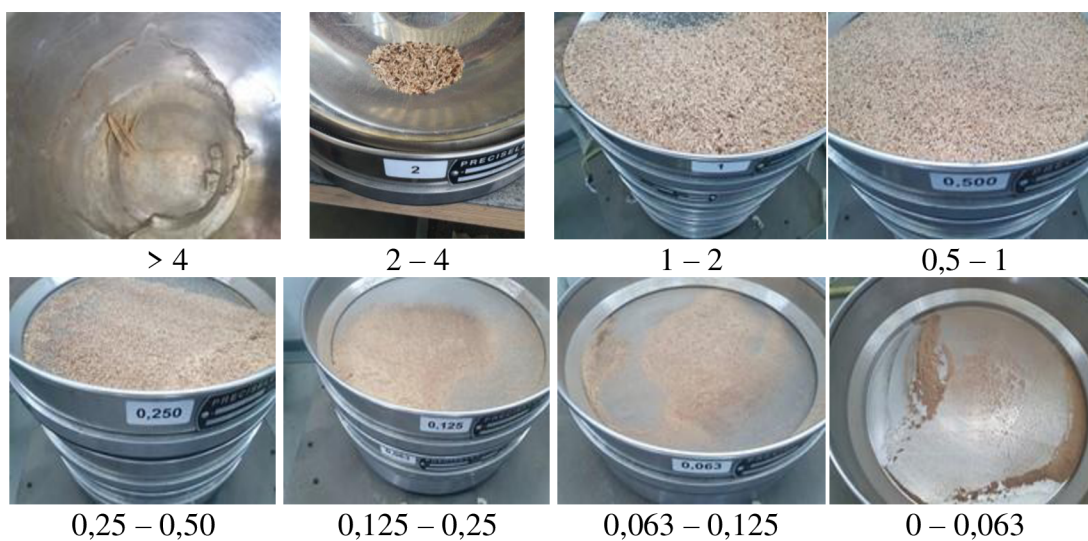
Sypký zkušební vzorek byl během zkoušky malým plamene umístěn v drátěném koši. Nejprve byl zapálen malý hořák a po ustálení plamene o výšce 20 mm byl na své místo umístěn drátěný koš se vzorkem. Následně se hořák naklonil a posouval se směrem k vzorku. Od prvního dotyku plamene vzorku se plamen nechal působit 30 sekund a poté se oddálí.

Během zkoušky se sledovalo, zda byl vzorek zapálen a zda byly přítomny hořící částice, jestli plamen dosáhl výšky 150 mm od bodu jeho působení a pokud ano, tak v jakém čase k tomu došlo.

## 7. Výsledky zkoušek

### 7.1. Stanovení zrnitosti – síťový rozbor

Síťový rozbor byl proveden na sítích o velikosti ok 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 a 0,063 mm pro vzorky recyklovaného papíru a hrubé a štěpky, které byly předem kondicionovány v prostředí s teplotou 23 °C a vlhkostí vzduchu 50 %. Výsledkem zkoušky jsou čáry zrnitosti zkoušených vzorků.



Obrázek 36: Síťový rozbor hrubé štěpky



Obrázek 37: Síťový rozbor jemné štěpky

Tabulka 8: Síťový rozbor hrubé dřevní štěpky

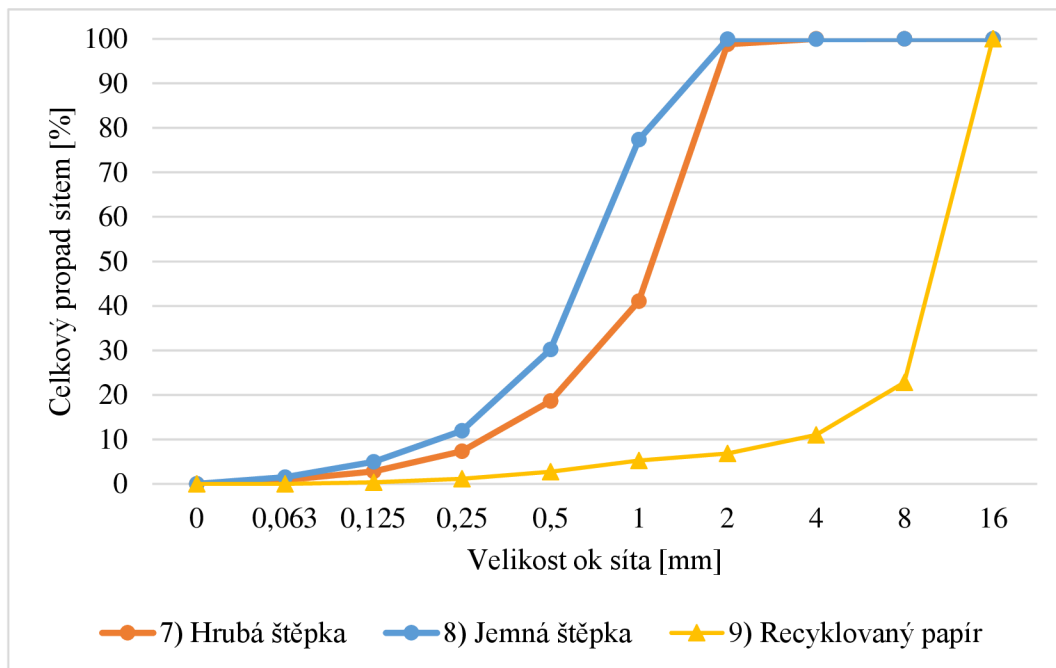
Velikost otvorů síta [mm]	Průměrný zůstatek [g]	Zůstatek na síti [%]	Celkový zůstatek na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0,06	0,02	0,02	99,98
2	2,92	1,18	1,20	98,80
1	143,53	57,77	58,97	41,03
0,5	55,63	22,39	81,36	18,64
0,25	28,15	11,33	92,69	7,31
0,125	11,27	4,53	97,23	2,77
0,063	4,69	1,89	99,11	0,89
0	2,21	0,89	100,00	0,00

Tabulka 9: Síťový rozbor jemné dřevní štěpky

Velikost otvorů síta [mm]	Průměrný zůstatek [g]	Zůstatek na síti [%]	Celkový zůstatek na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0,08	0,03	0,03	99,97
2	0,06	0,02	0,05	99,95
1	62,64	22,60	22,65	77,35
0,5	130,78	47,19	69,84	30,16
0,25	50,43	18,20	88,04	11,96
0,125	19,48	7,03	95,06	4,94
0,063	9,49	3,42	98,49	1,51
0	4,195	1,51	100,00	0,00

Tabulka 10: Síťový rozbor recyklovaného papíru

Velikost otvorů síta [mm]	Zůstatek [g]	Zůstatek na síti [%]	Celkový zůstatek na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
16	0,00	0,00	0,00	100,00
8	24,99	77,20	77,20	22,80
4	3,82	11,80	89,00	11,00
2	1,35	4,17	93,17	6,83
1	0,51	1,58	94,75	5,25
0,5	0,82	2,53	97,28	2,72
0,25	0,51	1,58	98,86	1,14
0,125	0,26	0,80	99,66	0,34
0,063	0,11	0,34	100,00	0,00
0	0	0,00	100,00	0,00



Graf 1: Křivky zrnitosti

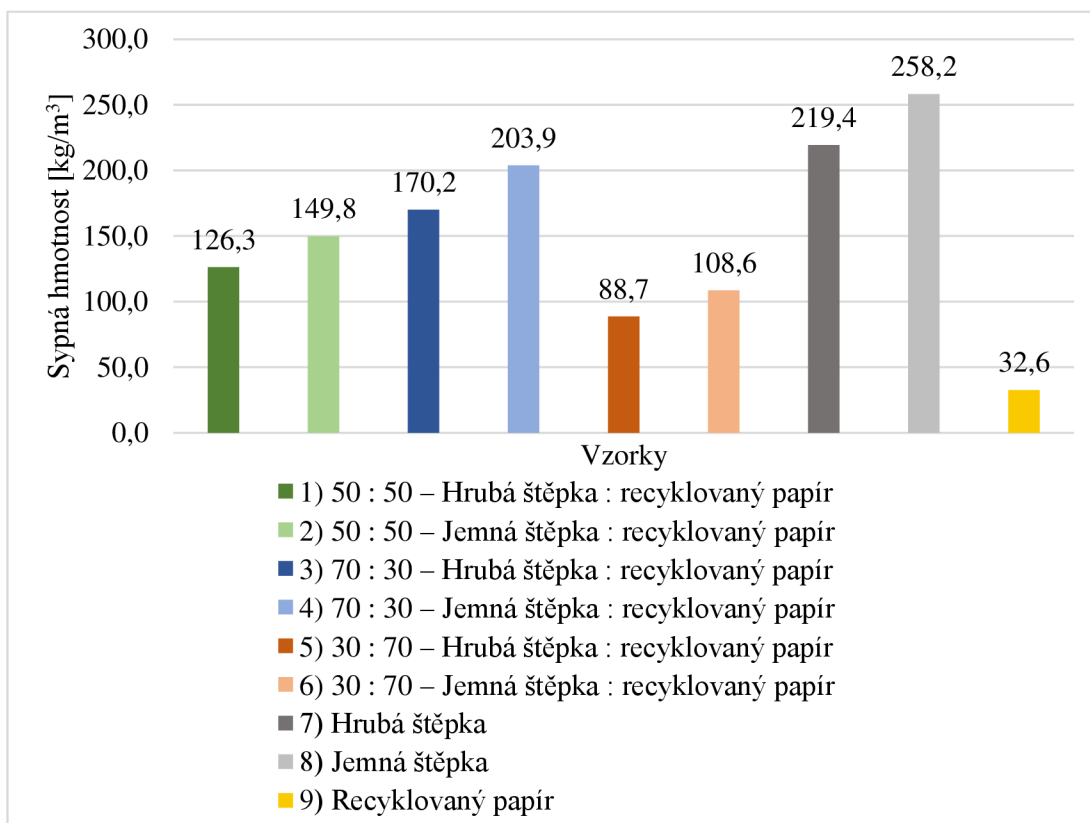
Ze zkoušky stanovení zrnitosti vyplývá, že hrubou štěpkou tvoří téměř 58 % částic o velikosti 1 – 2 mm. Jemnou štěpkou tvoří z 47 % částice o velikosti 0,5 – 1 mm. Největší částice má recyklovaný papír, který je z téměř 80 % tvořen částicemi většími jak 8 mm.

## 7.2. Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost byla stanovena na všech vzorcích 1 - 9. Na každém vzorku byla provedena 3 měření a průměrné výsledky měření jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 11: Stanovení sypné hmotnosti

Vzorek		Sypná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	50 : 50 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír	126,3
2	50 : 50 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír	149,8
3	70 : 30 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír	170,2
4	70 : 30 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír	203,9
5	30 : 70 – Hrubá dřevní štěpka : recyklovaný papír	88,7
6	30 : 70 – Jemná dřevní štěpka : recyklovaný papír	108,6
7	Hrubá dřevní štěpka	219,4
8	Jemná dřevní štěpka	258,2
9	Recyklovaný papír	32,6



Graf 2: Výsledky sypných hmotností

Největší sypnou hmotnost má dle očekávání jemná dřevní štěpka a nejmenší recyklovaný papír. Ze směsí vzorků má pak největší sypnou hmotnost vzorek č. 4 a nejmenší sypnou hmotnost vzorek č. 5. Z výsledků měření vyplývá, že čím větší množství jemné dřevní štěpky vzorek obsahuje, tím je i jeho sypná hmotnost větší.

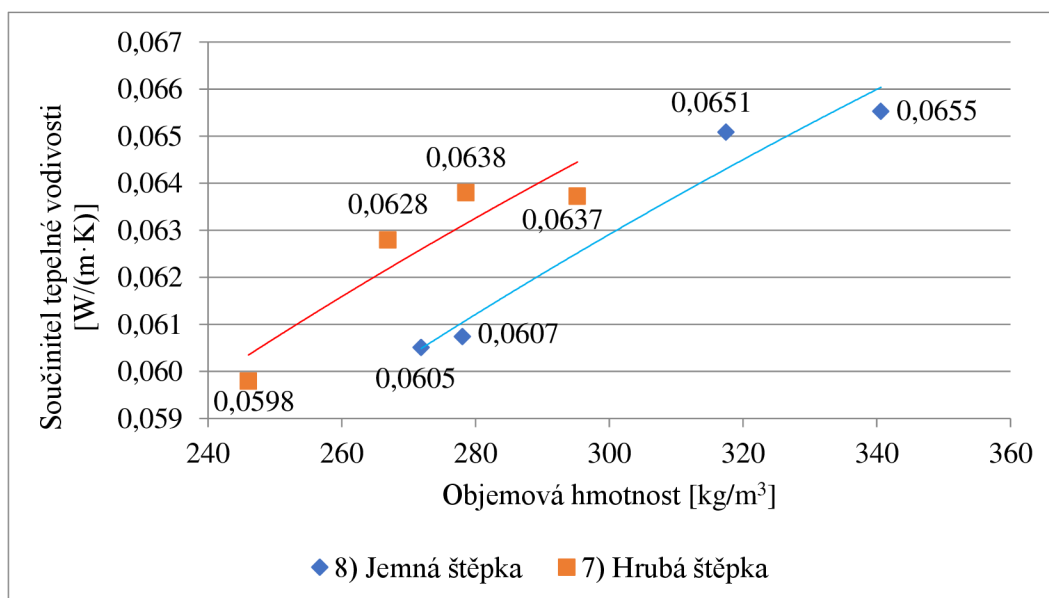
### 7.3. Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven nejprve na vzorcích jemné a hrubé štěpky, které byly měřeny ve volně sypaném i zhutněném stavu, aby se zjistilo pro který stav vychází součinitel tepelné vodivosti lépe. Pro výhodnější stav se poté provedlo měření vzorků č. 1 – 6. Na každém vzorku bylo provedeno 5 měření. Výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti každého vzorku jsou stanoveny aritmetickým průměrem těchto pěti měření a jsou uvedeny v tabulkách č. 12 a 13. Průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti zkoušených vzorků jsou uvedeny v grafech 3 a 4.



Tabulka 12: Stanovení součinitele tepelné vodivosti pro jemnou a hrubou štěpku

Vzorek	Vzorek ve stavu	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrný součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
7) Hrubá štěpka	Volně sypaná	246,0	0,0598
	Hutněná 1	266,9	0,0628
	Hutněná 2	278,6	0,0638
	Hutněná 3	295,2	0,0637
8) Jemná štěpka	Volně sypaná	271,9	0,0605
	Hutněná 1	278,0	0,0607
	Hutněná 2	317,4	0,0651
	Hutněná 3	340,6	0,0655
9) Papír	Volně sypaný	16,35	0,0407
	Hutněný	46,94	0,0418

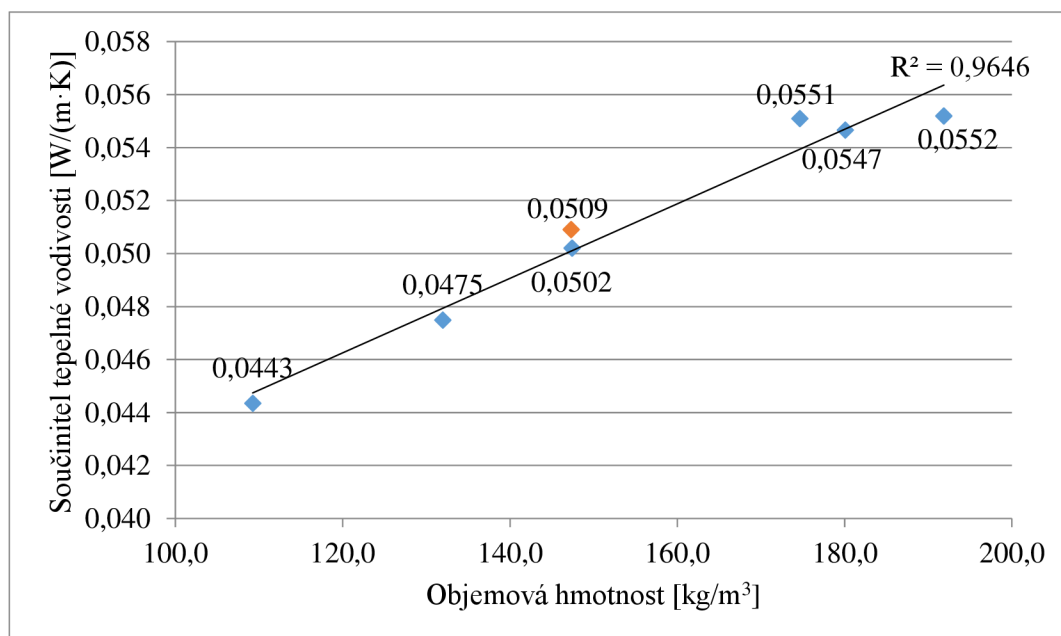


Graf 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u vzorků jemné a hrubé štěpky

Součinitel tepelné vodivosti je závislý na objemové hmotnosti vzorku. Čím je objemová hmotnost větší, tím je větší i součinitel tepelné vodivosti. Pokud teky štěpku zhutníme, zvýšíme tím její objemovou hmotnost, pak se zvýší se i součinitel tepelné vodivosti. Již z výsledků stanovení sypané hmotnosti je patrné, že hrubá štěpka má menší objemovou hmotnost než jemná štěpka. Je tedy zřejmé a výsledky měření potvrzují, že nejnižší součinitel tepelné vodivosti má hrubá štěpka ve volně sypaném stavu.

Tabulka 13: Stanovení součinitele tepelné vodivosti pro vzorky č. 1 - 6

Vzorek		Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrný součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
Vzorky ve volně sypaném stavu			
1	50 : 50 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	147,4	0,0502
2	50 : 50 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	180,1	0,0547
3	70 : 30 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	174,7	0,0551
4	70 : 30 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	191,9	0,0552
5	30 : 70 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	109,3	0,0443
6	30 : 70 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	132,0	0,0475
Vzorky ve ztuhnutém stavu			
5	30 : 70 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	147,3	0,0509



Graf 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti u vzorků č.

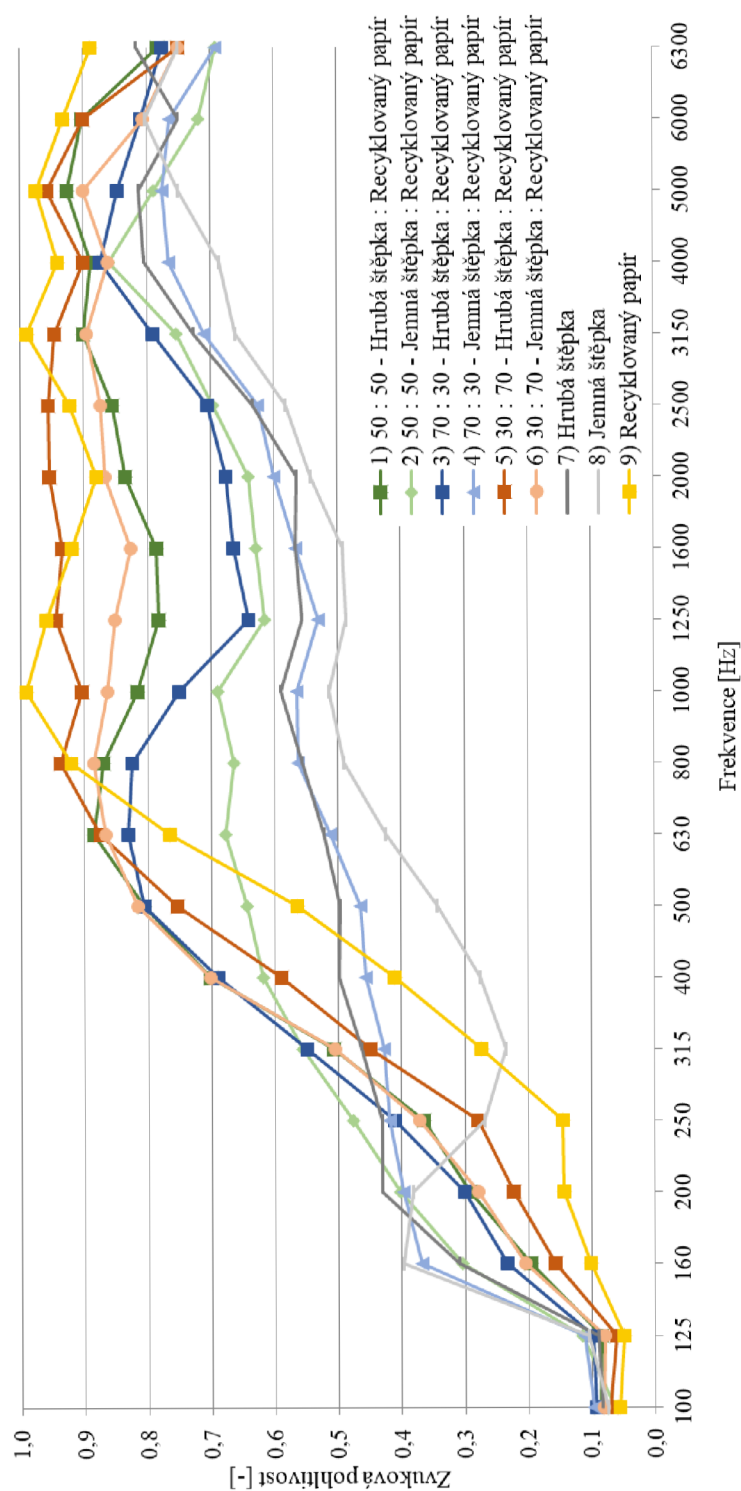
1 - 6

Z výsledků měření jednotlivých kombinací izolantů ve volně sypaném stavu je zřejmé, že nejnižší součinitel tepelné vodivosti má vzorek s nejmenší objemovou hmotností, což je vzorek č. 5 obsahující 30 % hrubé štěpky a 70 % recyklovaného papíru. Zkouška byla provedena i pro vzorek č. 5 ve ztuhnutém stavu, podle očekávání však bylo zjištěno, že ztuhnutím se zvýšila i jeho objemová hmotnost a tím se i jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti zvýšila.



## 7.4. Stanovení činitele zvukové pohltivosti

Hodnoty činitele zvukové pohltivosti byly stanoveny v třetinooktávových pásmech pro kmitočty v rozsahu 100 – 6300 Hz pomocí Kuntovy trubice. Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci je pro všechny měřené vzorky uveden v grafu č. 5.



Graf 5: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci

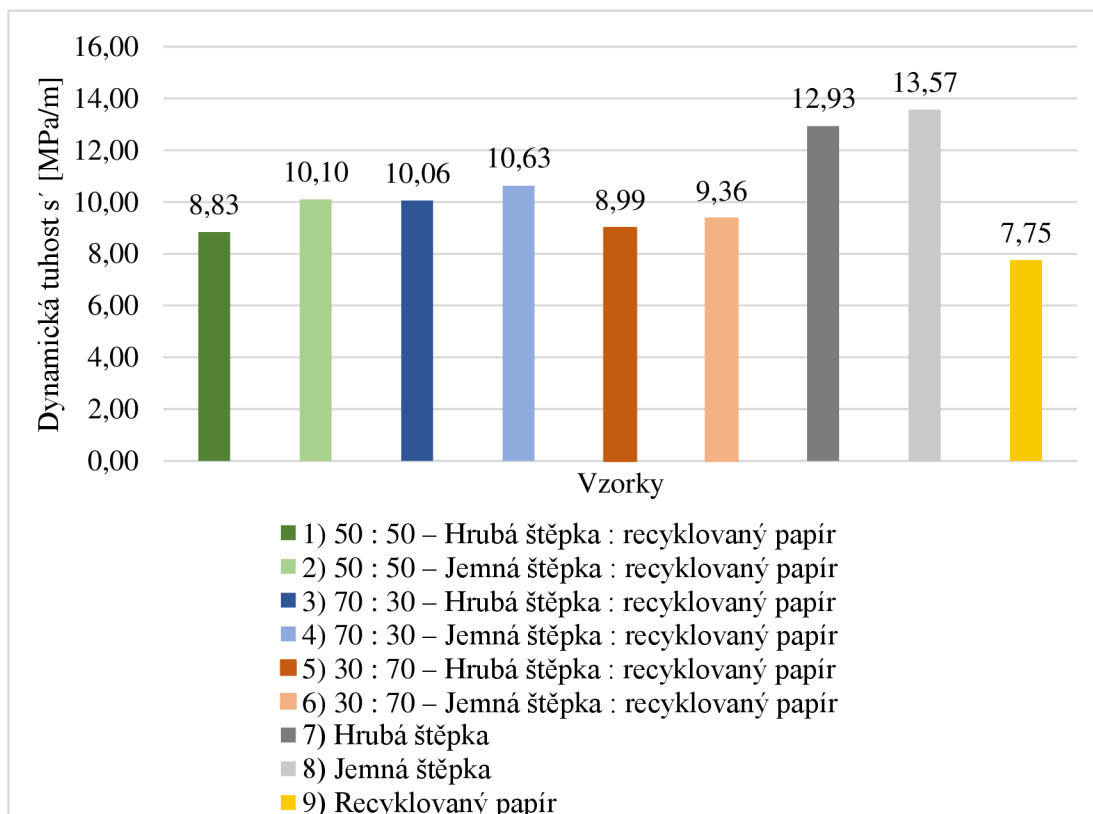
Z naměřených hodnot je patrné, že se zvyšující se frekvencí se zvyšuje i činitel zvukové pohltivosti a u každého vzorku dochází od určité frekvence k jeho kolísání. Nejhorší hodnoty činitele zvukové pohltivosti má vzorek jemné štěpky. Vzorek recyklovaného papíru má při frekvencích pod 1000 Hz nižší činitel zvukové pohltivosti než většina zkoušených vzorků, při frekvencích nad 1000 Hz má však již vyšší hodnoty než většina vzorků. Za nejlepší vzorek lze označit vzorek č. 5 obsahující 30 % hrubé štěpky a 70 % recyklovaného papíru, který má při frekvencích nad 1000 Hz nejvyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti ze všech kombinovaných vzorků.

## 7.5. Stanovení dynamické tuhosti

Stanovení dynamické tuhosti bylo provedeno na všech vzorcích 1 – 9. Vzorky byly volně nasypány do rámečku o výšce 51 mm a zatíženy zatěžovací deskou. Z naměřených dat byla vypočtena zdánlivé dynamické tuhosti, ke které přičetli dynamickou tuhost vzorku. Přehled naměřených hodnot je uveden v tabulce č. 14.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty ze zkoušky dynamické tuhosti

Vzorek	Tloušťka vzorku s deskou [mm]	Tloušťka vzorku bez desky [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Rezonanční kmitočet $f_r$ [Hz]	Zdánlivá dynamická tuhost $s'_t$ [MPa/m]	Dynamická tuhost vzduchu $s'_a$ [MPa/m]	Dynamická tuhost $s'$ [MPa/m]
1) 50 : 50 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	59,74	33,34	264,3	26	5,51	3,33	8,83
2) 50 : 50 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	60,58	34,175	328,26	29	6,85	3,25	10,10
3) 70 : 30 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	67,11	40,71	384,58	30	7,33	2,73	10,06
4) 70 : 30 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	66,05	39,645	448,31	31	7,83	2,80	10,63
5) 30 : 70 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	54,84	28,435	200,57	25	5,09	3,90	8,99
6) 30 : 70 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	55,21	28,81	233,83	26	5,51	3,85	9,36
7) Hrubá štěpka	73,17	46,765	662,29	36	10,55	2,37	12,93
8) Jemná štěpka	72,32	45,915	756,41	37	11,15	2,42	13,57
9) Recyklovaný papír	55,52	29,12	98,84	22	3,94	3,81	7,75



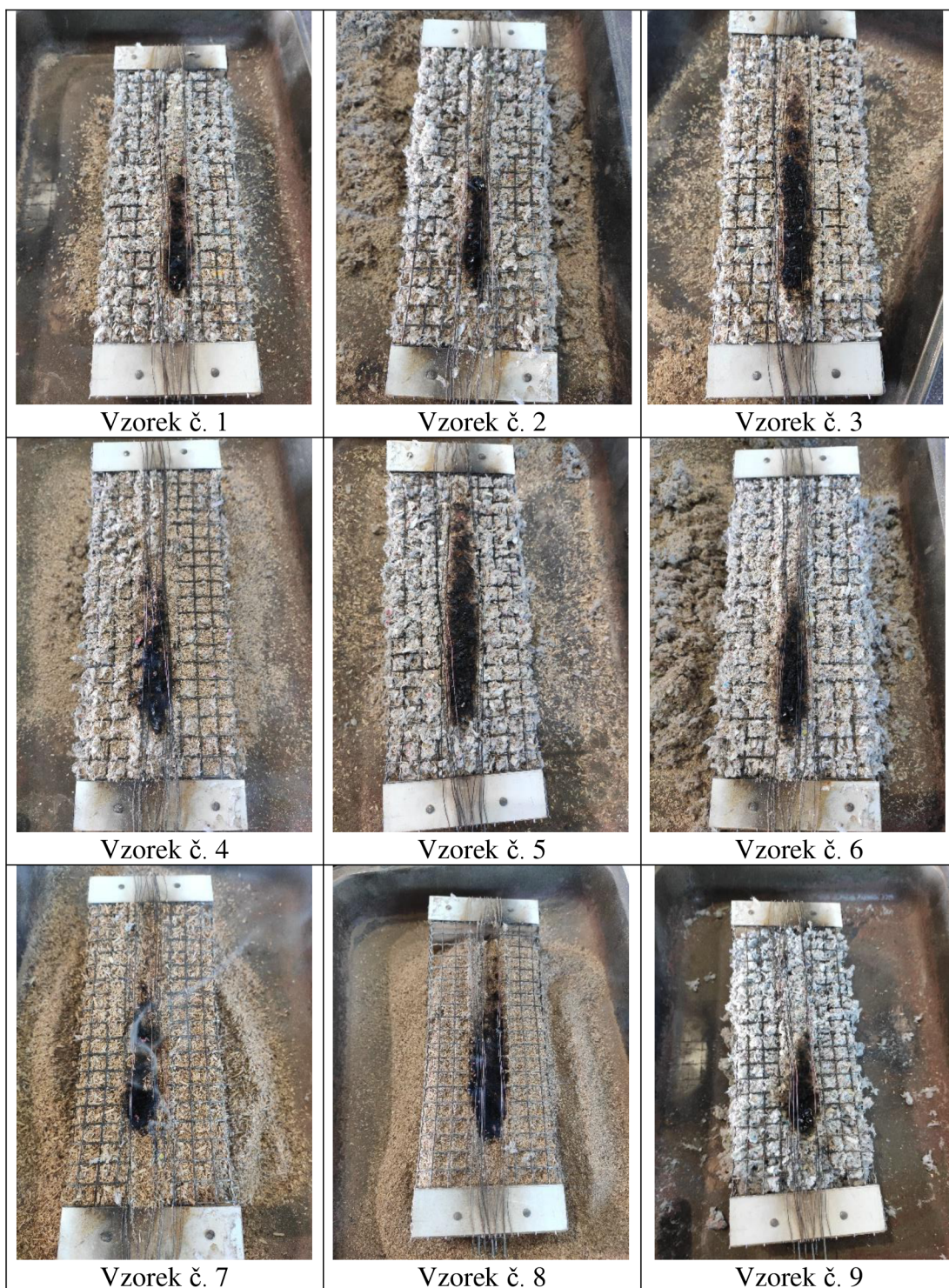
Graf 6: Výsledné hodnoty dynamické tuhosti

Ze stanovení dynamické tuhosti je zřejmé, že nejvyšší dynamickou tuhost má jemná dřevní štěpka a naopak nejnižší dynamickou tuhost má recyklovaný papír. Z kombinovaných vzorků má nejvyšší dynamickou tuhost vzorek č. 4., obsahující 70 % jemné štěpky a 30 % recyklovaného papíru. Dle ČSN 73 0532 [4] se z hlediska dynamické tuhosti při zatížení 2 kPa řadí všechny vzorky do kategorie I.

## 7.6. Stanovení reakce na oheň – zkouška malým zdrojem plamenem

Zkouška malým plamenem byla provedena na všech vzorcích 1 – 9. Během zkoušky byly sypké vzorky umístěny v drátěném koši o rozměrech 200×40×90 mm. Vzorky byly vystaveny působení plamene po dobu 30 sekund. Průběh zkoušky byl sledován a poznamenán do tabulky č. 15.





*Obrázek 38: Vzorky po zkoušce reakce na oheň*

Tabulka 15: Vyhodnocení zkoušky reakce na oheň

Vzorek	Hmotnost vzorku [g]	Zapálení	Výška plamene [mm]	Třída reakce na oheň
1) 50 : 50 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	136,4	NE	-	D
2) 50 : 50 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	161,8	NE	-	D
3) 70 : 30 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	183,8	NE	-	D
4) 70 : 30 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	220,2	NE	-	D
5) 30 : 70 – Hrubá štěpka : recyklovaný papír	95,8	NE	-	D
6) 30 : 70 – Jemná štěpka : recyklovaný papír	117,3	NE	-	D
7) Hrubá štěpka	236,9	NE	-	D
8) Jemná štěpka	278,9	ANO	30	E
9) Recyklovaný papír	35,3	NE	-	D

Z výsledků zkoušky je patrné, že kromě vzorku jemné štěpky nedošlo k zapálení vzorků malým plamenem. Vzorek jemné štěpky byl zapálen, ale jeho plamen dosáhl pouze do výšky 30 mm, což znamená, že je schopen odolávat působení malého plamene po krátkou dobu bez významného rozšíření plamene. Lze jej tedy zařadit do třídy reakce na oheň E. Ostatní vzorky jsou schopny odolávat působení malého plamene po delší dobu bez významného rozšíření plamene, lze tedy u nich předpokládat třídu reakce na oheň D.

## 8. Diskuze výsledků

Bakalářská práce se věnovala vývoji ekologického izolačního materiálu na bázi přírodních surovin. Za tímto účelem byly v rámci teoretické části vyhledány již používané foukané izolace a přírodní suroviny které by bylo možno použít pro výrobu foukaných izolací. Následně byla vybrána dřevní štěpka z kořenových náběhů a běžně dostupná foukaná izolace z recyklovaného papíru. Tyto suroviny jsou v naší oblasti dostupné a vzhledem k tomu, že se jedná o druhotné suroviny, je pravděpodobné, že výsledný izolant by mohl být pro spotřebitele i ekonomicky výhodný.

V rámci praktické části bylo navrženo a za laboratorních podmínek vyrobeno 6 vzorků, které v různých poměrech kombinují jemnou a hrubou dřevní štěpku a recyklovaný papír. Další 3 vzorky byly referenční a jednalo se o čistou jemnou a hrubou štěpku a recyklovaný papír. Vzorky byly podrobeny zkouškám, které ověřili jejich tepelně izolační, akustické vlastnosti a odolnost proti ohni.

Ze stanovení zrnitosti je patrné, že největší částice obsahuje vzorek recyklovaného papíru. Pokud k němu přidáme jemnou či hrubou štěpku, vyplníme tím mezery mezi velkými částicemi, čímž zvýšíme i sypnou/objemovou hmotnost výsledného izolantu.

Ze stanovení sypné hmotnosti jsme zjistili, že ze vzorků 1 – 6 má největší sypnou hmotnost vzorek č. 4 obsahující 70 % jemné štěpky a 30 % recyklovaného papíru a nejmenší sypnou hmotnost vzorek č. 5 obsahující 30 % hrubé štěpky a 70 % recyklovaného papíru.

Pro zjištění tepelně izolačních vlastností bylo u vzorků provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti. Z výsledků měření na hrubé a jemné štěpce se volně sypaném i zhutněném stavu vyplývá, že nejnižší součinitel tepelné vodivosti má hrubá štěpka ve volně sypaném stavu. Má i nižší sypnou hmotnost. Při postupném hutnění se tepelná vodivost postupně zvyšuje. Z výsledků měření na vzorcích 1 – 6, které byly zkoušeny jen ve volně sypaném stavu (s výjimkou vzorku č. 5) je zřejmé, že nejnižší součinitel tepelné vodivosti má vzorek č. 5 obsahující 30 % hrubé štěpky a 70 % recyklovaného papíru. I zde byla prokázána závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti, tuto závislost potvrzují i výsledky dosažené na zhutněném vzorku č. 5. Ve všech případech jsou hodnoty tepelných vodivostí vyšší než hodnoty u čistého materiálu na bázi papíru (vzorek č. 9). U vzorku č. 5 však tento rozdíl není tolik významný a tepelné vodivosti lze považovat za srovnatelné.

Ze stanovených průběhů činitele zvukové pohltivosti je patrné, že menší přídavek štěpky má pozitivní vliv na průběh zvukové pohltivosti na nižších frekvencích. U vyšších přídavků byly zjištěné vlastnosti horší ve většině frekvenčního pásma, přičemž čisté štěpky vykazují výhodné vlastnosti pouze u nízkých frekvencí do 315 nebo 400 Hz (dle typu štěpky). V případě dynamické tuhosti bylo zjištěno, že

jsou všechny vzorky dynamicky měkké, nicméně vykazují rozdílné tuhosti, což je patrné z rozdílných tloušťek vzorků po zatížení zatěžovací deskou. Největšího stlačení bylo dosaženo u vzorků 5, 6 a 9 tedy u recyklovaného papíru a vzorů s vyšším podílem recyklovaného papíru, kdy došlo k velmi výraznému zhutnění o cca 43-44 % k původnímu objemu. V případě reakce na oheň bylo potvrzeno, že přídavek štěpky nemá zásadní dopad na třídu reakce na oheň. S výjimkou čisté jemné štěpky nedošlo v žádném případě k zapálení vzorku, proto lze předpokládat u všech směsných vzorků třídu reakce na oheň D (případně lepší, dle složení).

## 9. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyvinout ekologickou foukanou izolaci, který by byl použitelný v oblasti ekologických dřevostaveb. Pro vývoj nového izolantu byla použita dřevní štěpka z kořenových náběhů, která byla podrcena na dvě frakce a foukaná izolace z recyklovaného papíru. Tato kombinace byla zvolena na základě předešlého průzkumu dostupnosti přírodních surovin v naší oblasti.

Bylo snahou vhodně modifikovat recyklovaný papír tak, abychom zlepšili jeho akustické vlastnosti. Bylo proto vytvořeno 6 vzorků, které byly smíchány v různých poměrech recyklovaného papíru, jemné a hrubé štěpky.

Z výsledků měření vyplývá, že hrubá štěpka vykazuje lepší vlastnosti než štěpka jemná. Bylo také zjištěno, že přídavkem 30 % hrubé štěpky k recyklovanému papíru se zvýší sypná/objemová hmotnost výsledného materiálu, díky čemuž selepší průběh zvukové pohltivosti u nižších frekvencích. Z pohledu tepelně izolačních vlastností tato směs vykazuje jen mírné horší vlastnosti než samostatný recyklovaný papír. Prokázalo se také, že přidáním malého množství hrubé štěpky se nezhoršuje třídu reakce na oheň výsledného materiálu.

Přidáním štěpky jakož to těžce zpracovatelného materiálu můžeme snížit cenu foukané izolace. Očekává se, že přídavek štěpky bude mít také pozitivní vliv na omezení sesedání materiálu. Můžeme tedy říci, že pro výrobu ekologické foukané izolace se jeví jako nejlepší izolant vzorek č. 5 skládající se z 30 % hrubé štěpky a 70 % recyklovaného papíru.

## 10. Použité zdroje:

- [1] PARIS AGREEMENT. In: . Paris: UNITED NATIONS, 2015. Dostupné také z: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_pari\\_s\\_agreement.pdf?fbclid=IwAR1mCAIpwpiNtbF2ciBEzgaf62R8bysLeYW9bFgURxOm\\_DChZL-0zWtldIk](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_pari_s_agreement.pdf?fbclid=IwAR1mCAIpwpiNtbF2ciBEzgaf62R8bysLeYW9bFgURxOm_DChZL-0zWtldIk)
- [2] KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. In: . Kyoto: UNITED NATIONS, 1998. Dostupné také z: [https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf?fbclid=IwAR3Avqwkic0JDbV95nyzV-EwlsRHzkp2kHsybUVv-1V1SwoGQ-ooSrH8\\_gI](https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf?fbclid=IwAR3Avqwkic0JDbV95nyzV-EwlsRHzkp2kHsybUVv-1V1SwoGQ-ooSrH8_gI)
- [3] Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby. In: 81/2009.
- [4] ČSN 73 0532 *Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních konstrukcí a výrobků - Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, prosinec 2020.
- [5] ČSN 73 0540 *Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, červen 2005.
- [6] ČSN 73 0540 *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2011.
- [7] ČSN 73 0540 *Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, listopad 2005.
- [8] Zákon č. 258/2000 Sb. *o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů*. In: 74/2000.
- [9] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. *o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. In: 97/2011.
- [10] ČSN EN ISO 9229 *Tepelné izolace – Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2021.
- [11] Shafiqul Islam a Gajanan Bhat. *Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles*. Journal of Environmental Management [online]. Elsevier, 1. prosince 2019 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971931254X?fbclid=IwAR1R4UbWwfRbHYwYhqHdGwWnvBuN95zn0EE0CvFE\\_9Jg8IFNE6KVVWUDeO4g#fig3](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971931254X?fbclid=IwAR1R4UbWwfRbHYwYhqHdGwWnvBuN95zn0EE0CvFE_9Jg8IFNE6KVVWUDeO4g#fig3)
- [12] *Stavební látky a geologie - Zkoušení izolačních materiálů* [online]. In: . [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/BI002/Kap.%205%20ZKOU%C5%A0EN%C3%8D%20IZOLA%C4%8CN%C3%8DCH%20MATERI%C3%81L%C5%AE.pdf>
- [13] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Fyzika stavebních látek: Fyzikální vlastnosti stavebních látek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.



- [14] ČSN EN 12667 *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2001.
- [15] ISO 8301 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus, Amd1: 2010.
- [16] ISO 8302:1991 *Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus*. 1991.
- [17] ČSN 72 1105 (721105) *Stanovenie koeficientu tepelnej vodivosti metódou nestacionárneho tepelného toku*. 1991.
- [18] ČSN ISO 9052-1 *Stanovení dynamické tuhosti – Část 1: Materiály pro izolaci plovoucích podlah v bytových objektech*. Praha: Centrum služeb pro normalizaci, leden 1993.
- [19] Šťastník, S., Zach, J., *Zkoušení izolačních materiálů*, CERM, Brno 2002, ISBN 80-214-2253-X
- [20] ZACH, Jiří. *Speciální izolace: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. 1*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006
- [21] HALAHYJA, M. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. Bratislava: Jada group, 1998.
- [22] ČSN EN 15101-1+A1 *Tepelně izolační výrobky pro budovy – Výrobky z volně sypané celulózy (LFCI) vyráběné in-situ - Část 1: Specifikace pro výrobky před zabudováním*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, březen 2020.
- [23] EAD-040138-01-1201 *IN-SITU FORMED LOOSE FILL THERMAL AND/OR ACOUSTIC INSULATION PRODUCTS MADE OF VEGETABLE FIBRES*. EOTA, May 2018.
- [24] EAD-040456-00-1201 *IN-SITU FORMED LOOSE FILL THERMAL AND/OR ACOUSTIC INSULATION PRODUCTS MADE OF ANIMAL FIBRES*. EOTA, March 2017.
- [25] TECHNICKÝ LIST: CLIMASTYREN. *CIUR* [online]. 03. 10. 2016 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: [https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL\\_A4\\_Climastyren\\_10-2016.pdf](https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL_A4_Climastyren_10-2016.pdf)
- [26] Foukaný polystyren. *Ekologická foukaná izolace* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.ekoizolace.cz/sluzby/foukana-mineralni-skelna-izolace/>
- [27] TECHNICKÝ LIST: CLIMASTONE S. *CIUR* [online]. 3. 12. 2013 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: [https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL\\_A4\\_Climastone\\_S\\_12-2013.pdf](https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL_A4_Climastone_S_12-2013.pdf)
- [28] Foukaná čedičová izolace. *Ekologická foukaná izolace* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.ekoizolace.cz/sluzby/foukana-cedicova-izolace/>

- [29] TECHNICKÝ LIST: CLIMAGLASS-W. *CIUR* [online]. 22.05.2017 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: [https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL\\_A4\\_Climaglass-W\\_05-2017.pdf](https://www.ciur.cz/wp-content/uploads/2022/03/TL_A4_Climaglass-W_05-2017.pdf)
- [30] Foukaná minerální skelná izolace. *Ekologická foukaná izolace* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.ekoizolace.cz/sluzby/foukana-mineralni-skelna-izolace/>
- [31] ČSN EN ISO 14064-1 (010964) *Skleníkové plyny - Část 1: Specifikace s návodem pro stanovení a vykazování emisí a propadů skleníkových plynů pro organizace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [32] Technický list - CLIMAWOOD. *CIUR* [online]. 30. 5. 2019 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.ciur.cz/soubor/zobrazit/technicky-list-climawood>
- [33] Technický list - Climatizer Plus. *CIUR* [online]. 21. 11. 2016 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.ciur.cz/soubor/zobrazit/technicky-list-climatizer-plus>
- [34] Foukaná celulózová izolace. *Ekologická foukaná izolace* [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekoizolace.cz/sluzby/foukana-celulozova-izolace/>
- [35] Filip Fedorika, Jiri Zach, Marja Lehto, Hanna-Riitta Kymäläinen, Risto Kuisma, Marja Jallinoja, Kimmo Illikainen a Sanna Alitalo. Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. *Elsevier*. 2021. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111528>
- [36] Veronique Cerezo. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. June 2005. Thesis for: Ph.D. Université Gustave Eiffel. Vedoucí práce Claude Boutin, Laurent Arnaud.
- [37] Ons Hamdaoui, Laurent Ibossa, Atef Maziouda, Mohamed Safic a Oualid Limamb. Thermophysical characterization of Posidonia Oceanica marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings. *Elsevier*. 2018, (180), 68-76. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195>
- [38] M.Ali, A.Alabdulkarem, A.Nuhait, et al. *Thermal and acoustic characteristics of novel thermal insulating materials made of Eucalyptus Globulus leaves and wheat straw fibers*. Saudi Arabia: Elsevier, November 2020, (32). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101452>
- [39] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Typy vláken: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [40] KORJENIC, Azra, Vít PETRÁNEK, Jiří ZACH a Jitka HROUDOVÁ. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(9), 2518-2523 [cit. 2022-05-05]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:[10.1016/j.enbuild.2011.06.012](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012)

- [41] Tepelné izolace: BJ13 - Speciální izolace. *Fakulta stavební Ústav technologie stavebních hmot a dílců* [online]. 2017 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <http://thd.fce.vutbr.cz/bakalar>
- [42] CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2009. ISBN 978-80-247-2532-1
- [43] Ottův slovník naučný: Len. *Leporelo* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://leporelo.info/len>
- [44] Danuta Barnat-Hunek, Piotr Smarzewski a Przemysław Brzyski. Properties of Hemp–Flax Composites for Use in the Building Industry. *Journal of Natural Fibers*. 2016, 410-425. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>
- [45] In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linum\\_usitatissimum.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linum_usitatissimum.jpg)
- [46] Konopí seté. *Leporelo.info* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://leporelo.info/konopi-sete>
- [47] VANĚREK, Jan. *KOVOVÉ A DŘEVĚNÉ MATERIÁLY*. Brno, 2006. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [48] Structure of Wood: Structure of Wood. SWST [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.swst.org/wp/wp-content/uploads/2017/06/structure1.pdf?fbclid=IwAR1sQzLV-yiNDUZGcslt2vUuu3Vd5UhvWMucycLFVam72IoRtMYAeIfxsg>
- [49] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Živočišná vlákna: Učební texty Fakulty textilní*. Liberec. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/materialy>
- [50] KUČHTÍK J. a kol. *Chov ovcí*, 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007, 112 s. ISBN 978-80-7375-094-7
- [51] Živočišná vlákna: Ovčí vlna. *TURBO* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=863&chapterid=507>
- [52] ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červen 2012.
- [53] ČSN EN 1097-3 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1999.
- [54] ČSN ISO 10534-1: *Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicih – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny*. Praha: Český normalizační institut, leden 1999.
- [55] *BJ07 Izolační materiály - Návod do cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2011.

[56] 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, červenec 2020.