



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

STAVEBNÁ FAKULTA

**Ing. Andrea Biskupičová**

**Autoreferát dizertačnej práce**

Ľahké betóny na báze recyklovaných plastov

**na získanie akademického titulu**

„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

**v doktorandskom študijnom programe:**

3659

Technológia stavieb

**v študijnom odbore:**

Stavebníctvo

**Forma štúdia:**

denná

Miesto a dátum: Bratislava, 31.05.2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre materiálového inžinierstva a fyziky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Andrea Biskupičová**  
Katedra materiálového inžinierstva a fyziky, SvF STU  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.**  
Katedra materiálového inžinierstva a fyziky, SvF STU  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Zuzana Sternová, PhD.**  
TSÚS, n.o.  
Studená 967/3, 821 04 Bratislava  
**doc. Vojtech Chmelík, PhD.**  
Stavebná fakulta STU v Bratislave  
Katedra materiálového inžinierstva a fyziky  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava  
**Ing. Peter Matiašovský, PhD.**  
Ústav stavebníctva a architektúry SAV  
Dúbravská cesta 9, 845 03, Bratislava 45

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa ..... o .....hod. v miestnosti C0808 na Katedre materiálového inžinierstva a fyziky Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

.....  
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan SvF STU

## OBSAH

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ÚVOD</b> .....                                                 | 4  |
| <b>1. CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE</b> .....                    | 4  |
| <b>2. METODIKA PRÁCE - EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b> .....              | 5  |
| 2.1. <i>Použité materiály</i> .....                               | 5  |
| 2.1.1. Plnivo z recyklovaných plastov.....                        | 5  |
| 2.1.2. Spojivo.....                                               | 5  |
| 2.2. <i>Sledované vlastnosti a použité prístroje</i> .....        | 6  |
| 2.2.1. Stanovenie optimálneho množstva spojiva.....               | 6  |
| 2.2.2. Objemová hmotnosť.....                                     | 7  |
| 2.2.3. Tepelno-technické parametre.....                           | 7  |
| 2.2.4. Napätie pri stanovenej deformácii.....                     | 8  |
| 2.2.5. Súčiniteľ zvukovej pohltivosti.....                        | 8  |
| 2.3. <i>Dosiahnuté výsledky</i> .....                             | 9  |
| 2.3.1. Stanovenie optimálneho množstva spojiva.....               | 9  |
| 2.3.2. Objemová hmotnosť vzoriek.....                             | 10 |
| 2.3.3. Tepelno-technické parametre.....                           | 11 |
| 2.3.4. Napätie pri stanovenej deformácii.....                     | 12 |
| 2.3.5. Súčiniteľ zvukovej pohltivosti.....                        | 13 |
| <b>3. ZÁVERY</b> .....                                            | 18 |
| 3.1. <i>Prínos záverečnej práce pre prax a vednú oblasť</i> ..... | 19 |
| <b>Vybraný zoznam použitej literatúry</b> .....                   | 20 |
| <b>Zoznam publikačnej činnosti</b> .....                          | 20 |

## ÚVOD

Betón, umelý kompozitný materiál tvorený z cementu, kameniva vody a prípadne prísad a prímiesí, predstavuje v súčasnosti najpoužívanější stavebný materiál. Je to nepochybne vďaka možnosti širokospektrálneho využitia ako aj možnosti prispôbiť niektoré z vlastností požadovaným podmienkam.

Nároky na stavebné materiály sa neustále zvyšujú – dôvodom je najmä potreba urýchlenia procesu výstavby, ako aj ekonomické hľadisko. Z tohto hľadiska je betón náročný materiál, proces tuhnutia a tvrdnutia je pre kvalitu konštrukcie nevyhnutný. Hľadajú sa preto vhodné alternatívy, ktoré by vedeli tento proces urýchliť. Možným riešením sa javí náhrada cementu ako spojiva betónu rôznymi druhmi organických spojív.

V súčasnosti je často používaný ľahký betón, teda betón vyľahčený dutinami a pórami. Takto vytvorený betón sa používa na výrobu stavebných prvkov a konštrukcií, ktoré nepredstavujú nosnú konštrukciu. Vyznačujú sa tepelnoizolačnou schopnosťou a nízkou objemovou hmotnosťou – podľa normy STN EN 206+A2 do  $2000 \text{ kg/m}^3$  [1]. Nízka objemová hmotnosť sa môže dosiahnuť pridaním penotvornej či plynotvornej prísady, prípadne náhradou kameniva ako plniva iným, vyľahčeným plnivom. Medzi takto používané plnivá patria napríklad rôzne druhy penových plastov – polystyrén, polypropylén, polyuretán.

Stavebníctvo predstavuje tvorcu veľkého množstva odpadu a toto množstvo každoročne narastá. Preto sa v poslednej dobe hľadajú možnosti, ako tvorbu odpadov v stavebníctve znížiť. Medzi možné riešenia tohto environmentálneho problému patrí recyklácia materiálov. V stavebníctve je možné použiť odpad zo stavebného procesu napríklad ako plnivo do ľahkých betónov, mált, omietok.

## 1. CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

### Cieľ dizertačnej práce:

Cieľom dizertačnej práce bolo overenie možnosti využitia odpadových penových plastov ako plniva pri výrobe ľahkých betónov. Overiť sa mali dosiahnuté mechanické vlastnosti, hlavne pevnostné parametre ľahkých betónov, ako aj ich tepelno-technické parametre. Významným cieľom bolo aj overenie možnosti zlepšenia vybraných akustických vlastností ľahkých betónov s použitím recyklovaných penových plastov ako plniva. Vytvárané betóny by mohli mať využitie na výrobu protihlukových stien, či do deliacich priečok. K cieľom projektu možno zaradiť aj experimentálne overenie vhodnosti organického lepidla 4,4'-MDI (metyléndifenyli diizokyanát) na výrobu ľahkých kompozitov (ľahkých betónov, resp. plastobetónov) s plnivom na báze penových plastov, konkrétne EVA, PS, PVC, PU, PP a ich kombinácie v rôznych pomeroch (3:1, 1:1, 1:3).

### Tézy dizertačnej práce:

1. Stanoviť optimálne množstvo spojiva 4,4'-MDI pri konštantnej dávke recyklovaných plastov ako plniva, na základe merania objemovej expanzie, pevnostných a tepelno-technických charakteristík,

2. Vyrobiť vzorky s použitím konštantnej dávky spojiva 4,4' MDI a plniva – recyklovaných penových plastov a ich rôznych kombinácií,
3. Na vyrobených vzorkách stanoviť objemové hmotnosti,
4. Pomocou hydraulického lisu určiť napätia pri stanovených deformáciách vyrobených vzoriek (pevnosť v tlaku),
5. Pomocou prístroja ISOMET 2114 stanoviť súčiniteľ tepelnej vodivosti  $\lambda$ ,
6. Pomocou Kundtovej impedančnej trubice stanoviť súčiniteľ zvukovej pohltivosti  $\alpha$  vyrobených vzoriek.

## 2. METODIKA PRÁCE – EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### 2.1. Použité materiály

#### 2.1.1. Plnivo z recyklovaných plastov

Vo výskumnej časti práce boli sledované vybrané vlastnosti ľahkých betónov s použitím penových plastov ako plniva. Konkrétne sa jednalo o plasty: etylén-vinyl acetát (EVA), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyuretán (PU), polypropylén (PP) a kombinácie uvedených plastov v rôznych pomeroch – 3:1, 1:1, 1:3. Všetky uvedené recykláty (Obr.2.1) boli dodané firmou PRIMA - FO, s r.o. a ich vlastnosti sú bližšie špecifikované v Tab.2.1.



Obr. 2.1 – Použité recyklované plasty (EVA, PS, PVC, PU, PP) [autor]

Tab. 2.1 – Vybrané vlastnosti sledovaných penových plastov [2]

| Druh plniva        | Skratka | Frakcia | Sypná hmotnosť<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Hustota<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------|---------|---------|----------------------------------------|---------------------------------|
| etylénvinyl acetát | EVA     | 4/8     | 104,41                                 | 920 - 980                       |
| polyvinylchlorid   | PVC     | 0/4     | 433,33                                 | 930 - 1300                      |
| polystyrén         | PS      | 4/8     | 11,44                                  | 30 - 60                         |
| polyuretán         | PU      | 4/8     | 19,57                                  | 30 - 100                        |
| polypropylén       | PP      | 4/8     | 17,05                                  | 860 - 950                       |

#### 2.1.2. Spojivo

V experimentálnej časti bolo ako spojivo použité aromatické organické lepidlo metyléndifenyldiizokyanát (MDI), z ktorého existujú tri izoméry:

- 2,2'-MDI
- 2,4'-MDI
- 4,4'-MDI [3].

V roku 2016 bolo celosvetovo vyrobených viac ako 6 miliónov ton týchto izomérov. Najčastejšie používaným izomérom je izomér 4,4'-MDI (viac ako 60% z produkcie MDI), známy aj pod názvom čistý MDI alebo Conipur 360. 4,4'-MDI slúži na výrobu PU – na výrobu tony PU sa spotrebuje 616 kg 4,4'-MDI [3]. Spomínaný izomér bol použitý aj v tejto záverečnej práci, dodaný firmou CONICA (Obr.2.2).



Obr. 2.2 – Použité spojivo 4,4'-MDI [autor]

## 2.2. Sledované vlastnosti a použité prístroje

Keďže ľahké betóny sa používajú najmä na výstavbu nenosných stien či podlahových konštrukcií, dôležité sú najmä tepelno-technické a akustické parametre. Z tohto dôvodu bola podstatná časť práce zameraná na meranie a vyhodnocovanie práve spomínaných parametrov. Konkrétne sa jednalo o súčiniteľ tepelnej vodivosti  $\lambda$  a súčiniteľ zvukovej pohltivosti  $\alpha$ . V rámci experimentálnych prác však bolo potrebné navrhnuť optimálne zloženie kompozitov, resp. určiť optimálne množstvo spojiva a overiť tiež objemové hmotnosti a pevnostné parametre (deformácie pri definovanom napätí) kompozitov.

### 2.2.1. Stanovenie optimálneho množstva spojiva

Pre zistenie tepelno-technických a akustických parametrov je nutné najprv určiť ideálne množstvo spojiva potrebné na výrobu vzoriek. Pre stanovenie optimálneho množstva spojiva bolo použité konštantné množstvo plniva (8 l), menila sa len dávka spojiva 4,4' MDI (0,4 -1,0 l). V prípade tejto časti výskumu boli použité ako plnivo penové plasty – EVA plast (E), PVC (K) a ich kombinácia (EK) v pomere 1:1. Podrobné zloženie sledovaných zmesí je uvedené v Tab.2.2.

Použité zmesi boli naplnené do priehľadných pohárov do výšky 90 mm a bola zreteľne vyznačená horná hladina vzoriek na stenu plnených pohárov. Z každej zmesi boli naplnené 2 poháre. Stanovenie optimálneho množstva spojiva bolo definované na základe objemovej expanzie a pevnosti vzoriek po 24 hod.

Tab. 2.2 - Zloženie zámesí pre stanovenie optimálneho množstva spojiva

| Vzorka            | Plnivo [l] | Spojivo [l] | Pomer spojiva a plniva [%] |
|-------------------|------------|-------------|----------------------------|
| E <sub>1,0</sub>  | 8          | 1,0         | 12,5                       |
| E <sub>0,8</sub>  | 8          | 0,8         | 10,0                       |
| E <sub>0,6</sub>  | 8          | 0,6         | 7,5                        |
| E <sub>0,4</sub>  | 8          | 0,4         | 5,0                        |
| EK <sub>1,0</sub> | 8          | 1,0         | 12,5                       |
| EK <sub>0,8</sub> | 8          | 0,8         | 10,0                       |
| EK <sub>0,6</sub> | 8          | 0,6         | 7,5                        |
| EK <sub>0,4</sub> | 8          | 0,4         | 5,0                        |
| K <sub>1,0</sub>  | 8          | 1,0         | 12,5                       |
| K <sub>0,8</sub>  | 8          | 0,8         | 10,0                       |
| K <sub>0,6</sub>  | 8          | 0,6         | 7,5                        |
| K <sub>0,4</sub>  | 8          | 0,4         | 5,0                        |

### 2.2.2. Objemová hmotnosť

Objemová hmotnosť je definovaná ako podiel hmotnosti a objemu jednotlivých vzoriek, matematicky:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.3)$$

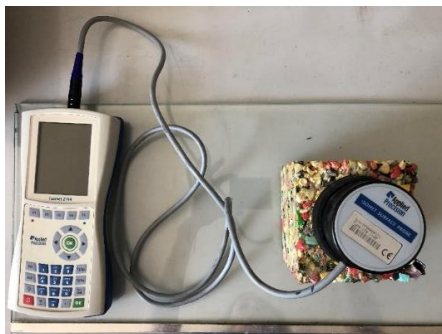
kde:

$\rho$  - objemová hmotnosť [kg/m<sup>3</sup>],  $m$  - hmotnosť [kg],  $V$  - objem [m<sup>3</sup>].

Rozmery vzoriek boli odmerané na dvoch miestach jednej hrany pomocou posuvného meradla s presnosťou na 0,01 mm. Hmotnosť vzoriek bola odmeraná pomocou digitálnych váh s presnosťou na 0,01 g. Objemová hmotnosť zámesi bola vypočítaná aritmetickým priemerom troch odmeraných vzoriek so zaokrúhlením sa desiatky.

### 2.2.3. Tepelno-technické parametre

Na vykonanie meraní tepelno-technických parametrov bol použitý prístroj ISOMET 2114 s plošnou sondou (Obr.2.4). Tento prístroj je schopný súčasne merať tepelnú vodivosť, difúziu, objemovú tepelnú kapacitu a teplotu. Merania boli vykonané na vzorkách s rozmermi 100x100x100 mm, vyrobenými v Laboratóriu SvF STU Bratislava.



Obr. 2.4 – ISOMET 2114 s plošnou sondou [autor]

#### 2.2.4. Napätie pri stanovenej deformácii

Pevnosť v tlaku v prípade použitia penových materiálov je kvôli vysokej pružnosti ťažko merateľná. Z tohto dôvodu bolo na sledovaných vzorkách merané napätie pri stanovenej deformácii, konkrétne pri deformáciách 2,5, 5, 7,5 a 10%. Meranie bolo vykonané na vzorkách 100x100x100 mm pomocou hydraulického lisu (Obr.2.5) v Laboratóriu SvF STU Bratislava.



Obr. 2.5 – Hydraulický lis na meranie napätí [autor]

#### 2.2.5. Súčiniteľ zvukovej pohltivosti

V tejto dizertačnej práci bol súčiniteľ zvukovej pohltivosti  $\alpha$  meraný pomocou Kundtovej impedančnej trubice (Obr.2.6) s dvomi mikrofónmi. Princíp merania je definovaný normou ISO 10534-1 [4]. Meranie bolo vykonané v Laboratóriu Akustiky na Katedre Fyziky a Astronómie KU Leuven (Belgicko).





Obr. 2.6 – Kundtova impedančná trubica [autor]

## 2.3. Dosiahnuté výsledky

### 2.3.1. Stanovenie optimálneho množstva spojiva

Ako je možné z výsledkov meraní vidieť (obr.3.1, tab.3.1), pri použití menšieho množstva spojiva (do 7,5% z objemu plniva) nedochádzalo k objemovej zmene vzoriek. V prípade vzoriek s použitím PVC ako plniva nedošlo ku objemovej expanzii vzoriek ani pri použití väčšieho množstva spojiva, a teda je možné tvrdiť, že množstvo použitého spojiva nemá priamy vplyv na objemové zmeny vzoriek. V prípade použitia EVA plastu (ako aj v prípade 50% náhrady EVA plastu PVC) pri použití menšieho množstva spojiva objemová expanzia nenastala. Najväčší nárast bol zaznamenaný v prípade použitia väčšieho množstva spojiva (12,5% z objemu plniva EVA plastu – vzorka  $E_{1,0}$ ), kedy bol objem vzoriek viac ako zdvojnásobený. V prípade zvyšných vzoriek pridanie množstva EVA plastu znamenalo zvýšenie objemovej expanzie vzorky.

Obr. 2.7 – Výsledky obj. expanzie – hore EVA, dole kombinácia EVA/PVC [5]



Vzorky s použitím 0,4 l spojiva mali tendenciu sa po vybratí z pohárových foriem rozpadávať, naopak vzorky s väčším množstvom spojiva (0,8 – 1 liter) zaznamenali výraznú objemovú expanziu (viď.Obr.2.7,Tab.2.3). Takisto dochádzalo k výraznému „stekaniu“ spojiva do spodnej časti formy.

Vzhľadom na tieto výsledky bola určená ako optimálna zmes s použitím 0,6 l spojiva (7,5% z množstva plniva). V prípade tejto zmesi nedošlo ku objemovej expanzii a zároveň boli zrná zmesi dostatočne súdržné.

Tab. 2.3 - Expanzia vzoriek

| Vzorka            | Druh plniva | Výška vzorky pri výrobe [mm] | Výška vzorky po 24 hod. [mm] |          | Nárast [%] |
|-------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------|------------|
|                   |             |                              | Vzorka 1                     | Vzorka 2 |            |
| E <sub>1,0</sub>  | EVA         | 90                           | 182,18                       | 180,08   | >100       |
| E <sub>0,8</sub>  | EVA         | 90                           | 52,07                        | 49,21    | 55-58      |
| E <sub>0,6</sub>  | EVA         | 90                           | 16,93                        | 0        | 18,81      |
| E <sub>0,4</sub>  | EVA         | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| EK <sub>1,0</sub> | EVA/PVC     | 90                           | 35,76                        | 37,28    | 39,7-41,4  |
| EK <sub>0,8</sub> | EVA/PVC     | 90                           | 6                            | 5        | 4,5-5,4    |
| EK <sub>0,6</sub> | EVA/PVC     | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| EK <sub>0,4</sub> | EVA/PVC     | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| K <sub>1,0</sub>  | PVC         | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| K <sub>0,8</sub>  | PVC         | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| K <sub>0,6</sub>  | PVC         | 90                           | 0                            | 0        | 0          |
| K <sub>0,4</sub>  | PVC         | 90                           | 0                            | 0        | 0          |

### 2.3.2. Objemová hmotnosť vzoriek

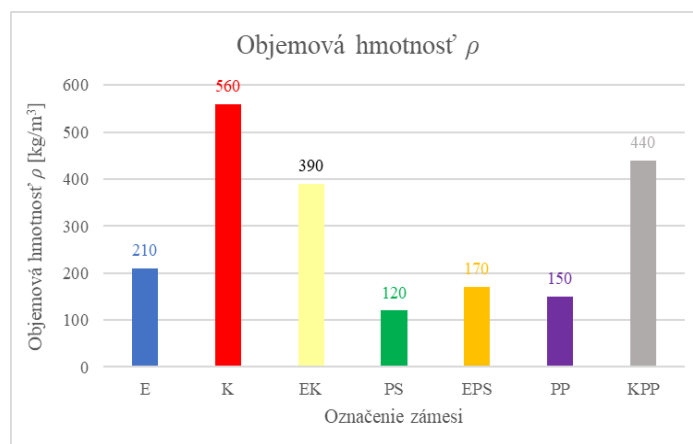
Objemová hmotnosť sledovaných zmesí sa určila ako priemerná hodnota objemových hmotností troch sledovaných vzoriek z rovnakej zmesi. Najnižšie hodnoty objemových hmotností dosiahli vzorky s použitím polystyrénu (PS) ako plniva – 120 kg/m<sup>3</sup>, následne polypropylén (PP) – 150 kg/m<sup>3</sup>, kombinácia EVA plastu a polystyrénu (EPS) v pomere 1:1 – 170 kg/m<sup>3</sup>, EVA plast (E) – 210 kg/m<sup>3</sup>, kombinácia EVA plastu a PVC (EK) – 390 kg/m<sup>3</sup> a kombinácia PVC a polypropylénu (KPP) v pomere 1:1 – 440 kg/m<sup>3</sup>. Najvyššie hodnoty boli zaznamenané pri vzorkách s použitím PVC (K) ako plniva – 560 kg/m<sup>3</sup>. Prehľad priemerných hodnôt zmesí je zaznamenaný v Tab.2.4. a Obr.2.8.

Tab. 2.4 - Objemová hmotnosť sledovaných zmesí

| Vzorka | Druh plniva | Hmotnosť [g] | Rozmery vzoriek [mm] |                |                | Objemová hmotnosť $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------|-------------|--------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------------------------------------|
|        |             |              | a <sub>1</sub>       | a <sub>2</sub> | a <sub>3</sub> |                                               |
| E      | EVA         | 211,68       | 98,95                | 99,81          | 100,70         | <b>210</b>                                    |
| K      | PVC         | 563,02       | 100,83               | 100,53         | 99,42          | <b>560</b>                                    |
| EK     | EVA/PVC     | 389,05       | 99,24                | 99,97          | 100,60         | <b>390</b>                                    |

|     |        |        |        |        |        |            |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| PS  | PS     | 120,60 | 99,77  | 103,76 | 100,12 | <b>120</b> |
| EPS | EVA/PS | 168,39 | 99,69  | 100,33 | 99,79  | <b>170</b> |
| PP  | PP     | 199,00 | 99,65  | 138,50 | 99,51  | <b>150</b> |
| KPP | PVC/PP | 471,99 | 100,15 | 106,87 | 99,95  | <b>440</b> |

Obr. 2.8 - Graf priem. hodnôt objem. hmotností vzoriek



### 2.3.3. Tepelno-technické parametre

Z pohľadu tepelno-technických parametrov boli merané viaceré veličiny, v tejto dizertačnej práci je vyhodnotený však len súčiniteľ tepelnej vodivosti (Tab.2.5, Obr.2.9).

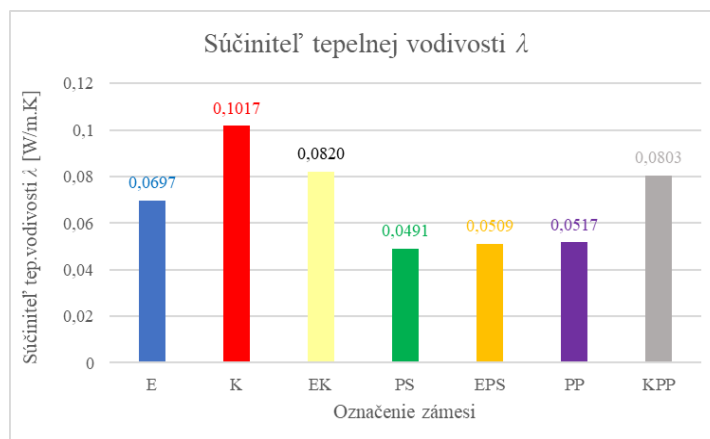
Podľa predpokladov najnižšie hodnoty súčiniteľa tep. vodivosti dosiahla zámes s použitím recyklátu polystyrénu ako plniva (0,0491 W/m.K). Len o málo vyššiu hodnotu (0,0509 W/m.K) dosiahla zámes s použitím kombinácie EVA plastu a polystyrénu v pomere 1:1 a zámes s polypropylénom (0,0517 W/m.K). Najvyššie hodnoty dosiahli zámesi s použitím kombinácie PVC a iného druhu plastu (EVA/PVC a PVC/PP) – 0,0803 a 0,0820 W/m.K. V prípade použitia 100% PVC ako plniva bola nameraná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti 0,1017 W/m.K.

Tab. 2.5 - Súčiniteľ tepelnej vodivosti sledovaných zmesí

| Vzorka | Druh plniva | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)] |
|--------|-------------|--------------------------------------------------|
| E      | EVA         | 0,0697                                           |
| K      | PVC         | 0,1017                                           |
| EK     | EVA/PVC     | 0,0820                                           |
| PS     | PS          | 0,0491                                           |
| EPS    | EVA/PS      | 0,0509                                           |
| PP     | PP          | 0,0517                                           |

|     |        |        |
|-----|--------|--------|
| KPP | PVC/PP | 0,0803 |
|-----|--------|--------|

Obr. 2.9 - Graf priemerných hodnôt súčiniteľa tepelnej vodivosti vzoriek



#### 2.3.4. Napätie pri stanovenej deformácii

Najvyššie hodnoty napätí dosiahla zmes EK5 (ako plnivo bolo použité PVC) konkrétne 0,29-0,41 MPa. So zvyšujúcim sa množstvom EVA plastu v tejto zmesi sa napätia pri stanovenej deformácii znižovali, a to až do 0,22 MPa. Samotný EVA plast dosiahol hodnoty napätí 0,05-0,09 MPa. Najnižšie napätia boli namerané v prípade použitia PP (vzorka PVCPP5) – 0,02-0,04 MPa. Nízke hodnoty napätí dosiahol aj PS (0,04-0,07 MPa) ako aj jeho kombinácie s EVA plastom (0,04-0,08 MPa). Všetky namerané hodnoty napätí pri sledovaných deformáciách sú zaznamenané v Tab.2.6.

Tab. 2.6 - Napätie zmesí pri sledovanej deformácii

| Vzorka | Druh plniva     | Napätie σ [MPa] pri deformácii |      |      |      |
|--------|-----------------|--------------------------------|------|------|------|
|        |                 | 2,5%                           | 5%   | 7,5% | 10%  |
| EPS1   | EVA             | 0,05                           | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| EPS2   | EVA 75% PS 25%  | 0,04                           | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| EPS3   | EVA 50% PS 50%  | 0,04                           | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| EPS4   | EVA 25% PS 75%  | 0,04                           | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| EPS5   | PS              | 0,04                           | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| EK2    | EVA 75% PVC 25% | 0,27                           | 0,31 | 0,34 | 0,36 |
| EK3    | EVA 50% PVC 50% | 0,25                           | 0,28 | 0,30 | 0,32 |
| EK4    | EVA 25% PVC 75% | 0,22                           | 0,25 | 0,27 | 0,28 |
| EK5    | PVC             | 0,29                           | 0,34 | 0,38 | 0,41 |
| PVCPP2 | PVC 75% PP 25%  | 0,13                           | 0,21 | 0,28 | 0,33 |
| PVCPP3 | PVC 50% PP 50%  | 0,07                           | 0,13 | 0,17 | 0,20 |
| PVCPP4 | PVC 25% PP 75%  | 0,04                           | 0,07 | 0,10 | 0,11 |
| PVCPP5 | PP              | 0,02                           | 0,02 | 0,03 | 0,04 |

## 2.3.5. Súčiniteľ zvukovej pohltivosti

Meranie súčiniteľa zvukovej pohltivosti  $\alpha$  bolo vykonané v Laboratóriu Akustiky na KU Leuven (Belgicko). Súčiniteľ zvukovej pohltivosti bol meraný na vzorkách so stanovenou výškou – 30 mm, 50 mm a 65 mm. Na rovnakých vzorkách bolo následne vykonané aj meranie so vzduchovou medzerou hrúbky 50 mm. Meranie bolo vykonané pomocou impedančnej trubice s priemerom 44,2 mm. Celkom bolo sledovaných 10 zmesí z rozdielnymi plnivami - EVA, EVA/PVC, EVA/PP, EVA/PS, PVC, PVC/PS, PP, PP/PS, PS, PU (viď. Obr.2.10). Vzorky boli prvotne vyrobené s výškou 65 mm a následne po odmeraní  $\alpha$  bez vzduchovej medzery a so vzduchovou medzerou boli zrezané na výšku 50 mm. Rovnako sa postupovalo následne po odmeraní  $\alpha$  - zrezaním vzoriek na hrúbku 30 mm.

Obr. 2.10 - Vzorky pre merania súčiniteľa zvukovej pohltivosti:

EVA, EVA/PVC, EVA/PP, EVA/PS, PVC, PVC/PS, PP, PP/PS, PS, PU (zľava doprava) [autor]



### *POROVNANIE SÚČINITELĽA ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI ROVNAKÉHO MATERIÁLU PRI RÔZNYCH HRÚBKACH*

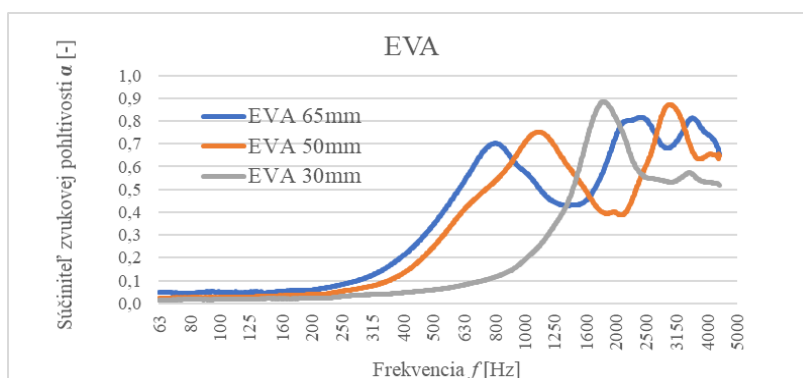
V prípade porovnávania rovnakého materiálu s použitím rozdielných hrúbok je možné rozdeliť túto kapitolu na dve kategórie:

- a) vzorky, pri ktorých bol použitý ako plnivo len jeden druh penového plastu,
- b) vzorky, pri ktorých boli použité ako plnivo dva rozdielne druhy penových plastov.

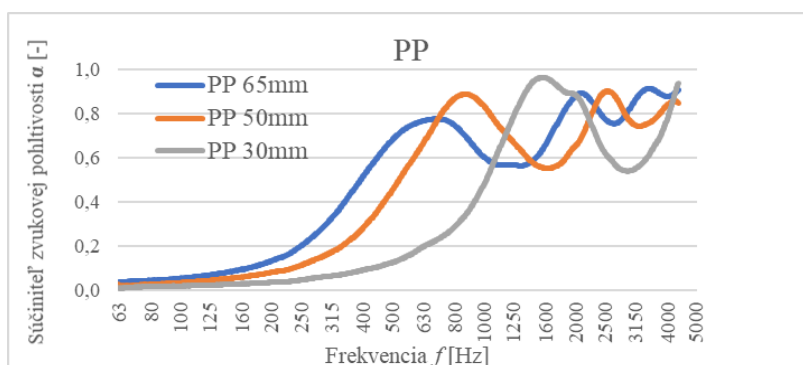
V prípade vzoriek s použitím jedného druhu plastu ako plniva bolo zaujímavé sledovať efekt zmenšenia hrúbky vzorky na zvukovú pohltivosť materiálu. Ako je možné vidieť na Obr.2.11, v prípade použitia EVA plastu ako plniva efekt zmenšenia výšky sledovanej vzorky mal účinok. Na grafe je možné sledovať nárast prvého vrcholu krivky súčiniteľa zvukovej pohltivosti z 0,7 na 0,9, ako aj celej zvyšnej časti krivky. Rovnaký priebeh je možné sledovať aj na grafe zobrazujúcom priebeh PP

(Obr.2.12), no v tomto prípade bol nárast súčiniteľa ešte väčší, konkrétne z 0,5-0,6 na 0,9. Oba materiály dosiahli najvyššiu hodnotu súčiniteľa zvukovej pohltivosti pri 1000 Hz. Toto frekvenčné pásmo je zaujímavé v prípade použitia materiálu na výrobu protihlukových stien pri železničnej doprave [6]. Ako je možné na Obr.2.13 vidieť, na vzorky s použitím PVC ako plniva nemala zmena hrúbky vzorky žiadny výrazný vplyv a súčiniteľ zvukovej pohltivosti mal podobný priebeh pri všetkých troch sledovaných hrúbkach. V prípade vzoriek s použitím PS (Obr.2.14) ako plniva došlo k zlepšeniu zvukovej pohltivosti už po prvom zmenšení hrúbky vzorky zo 65 na 50 mm. Následne po ďalšom zmenšení vzorky nedošlo k výraznej zmene súčiniteľa. Tento efekt je možné vysvetliť tak, že pri prvom zmenšení hrúbky vzorky bola odstránená časť, v ktorej sa nachádzalo väčšie množstvo spojiva. Rovnako ako vzorky EVA a PP, aj PS dosiahol najlepšie hodnoty súčiniteľa zvukovej pohltivosti vo frekvenčnom pásme 1000 Hz (cca 0,95).

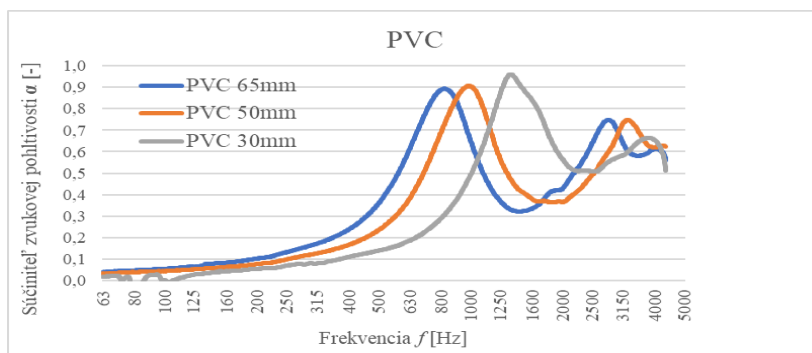
Obr. 2.11 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes EVA



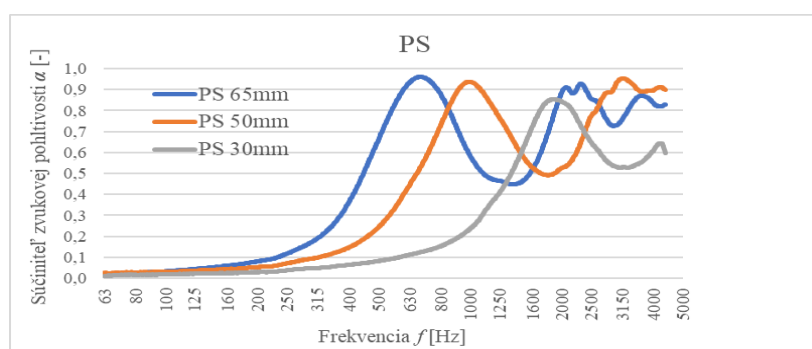
Obr. 2.12 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes PP



Obr. 2.13 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes PVC

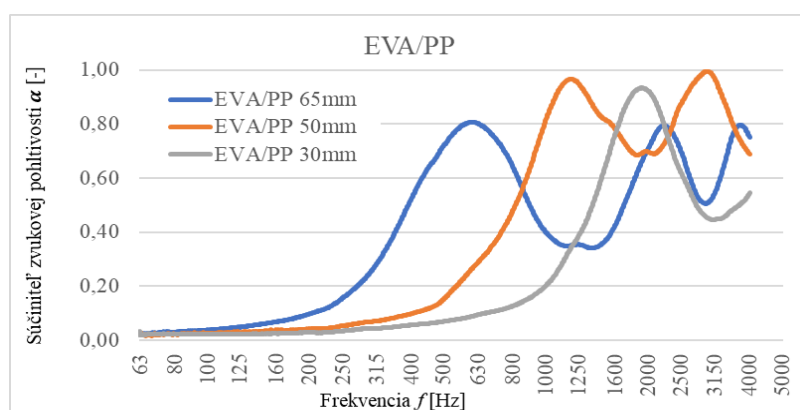


Obr. 2.14 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes PS



V prípade porovnávania rozdielnych hrúbok rovnakého materiálu s použitím kombinácie dvoch plnív boli zaznamenané najvyššie hodnoty  $\alpha$  v prípade vzoriek s polypropylénom (zámesi EVA/PP a PP/PS), vzorky sa správali stabilne a zmena hrúbky vzoriek nemala výrazný vplyv na zvukovú pohltivosť (Obr.2.15,2.19). Tieto vzorky zaznamenali najvyššie hodnoty pri hrúbke 50mm vo frekvenčných pásmach cca 1000 Hz a 3150 Hz. Z pohľadu celého spektra tejto zámesi boli pre frekvencie vyššie ako 800 Hz zaznamenané hodnoty vyššie ako 0,6, a teda tento materiál môžeme považovať za dobre zvukovo pohltivý.

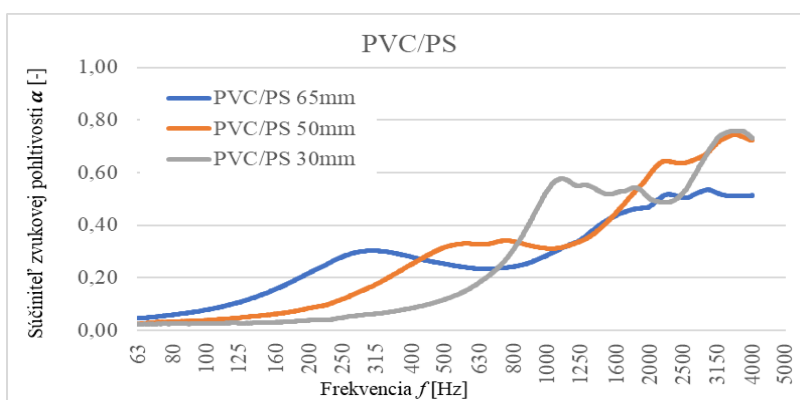
Obr. 2.15 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes EVA/PP



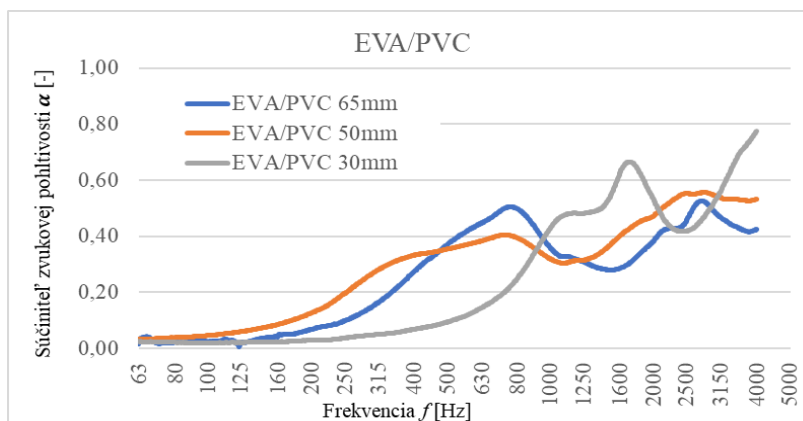
Naopak najnižšie hodnoty dosiahli zámesi s použitím PVC (EVA/PVC a PVC/PS) – konkrétne 0,3 až 0,7 v rámci celého spektra. Ako je možné vidieť na Obr.2.16 a 2.17, tieto vzorky sa nesprávali ako typické granulové materiály - nedošlo ku výraznému zvyšovaniu a následnému prudkému znižovaniu

súčiniteľa zvukovej pohltivosti  $\alpha$  pri určitých frekvenciách. Tento efekt bol pravdepodobne spôsobený vyplnením vzduchových medzier vo vzorke EVA, prípadne PS (frakcia 4/8) menšími granulami PVC (frakcia 0/4).

Obr. 2.16 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes PVC/PS



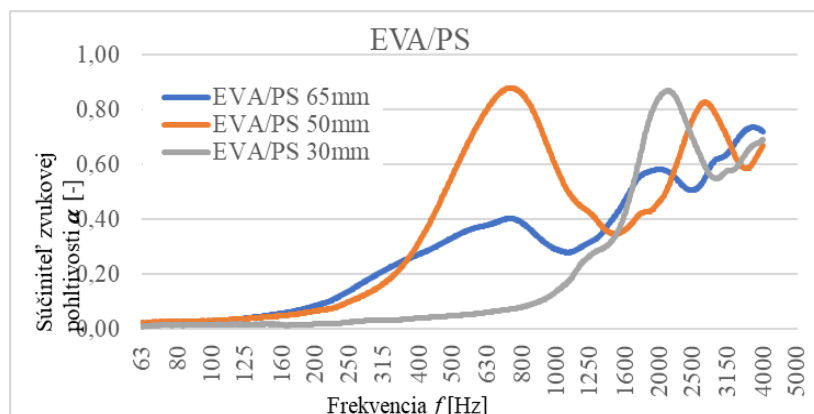
Obr. 2.17 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes EVA/PVC



V prípade zámesi EVA/PS došlo ku zvýšeniu hodnoty  $\alpha$  (Obr.2.18) po zmenšení vzoriek na výšku 50mm, čo bolo spôsobené odstránením tej časti vzorky s hrúbkou 65mm, ktorá obsahovala najviac spojiva.

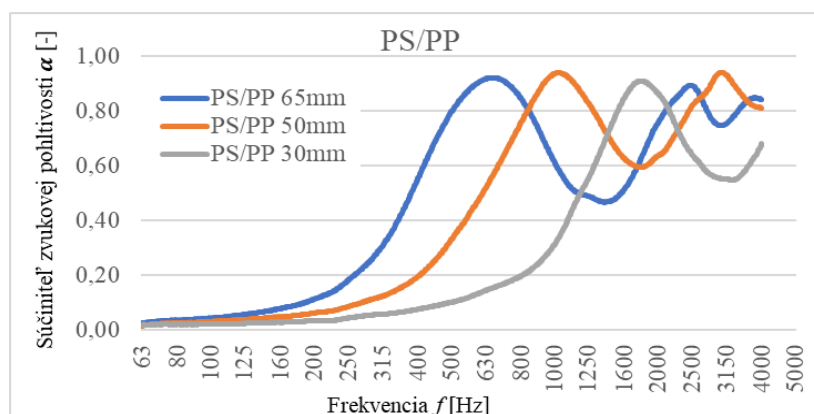
Obr. 2.18 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes EVA/PS





V prípade zámеси PS/PP je možné vidieť logický vývin zvukovej pohltivosti v prípade zmeny hrúbky vzoriek. Pri určitých frekvenciách je dokonca možné v prípade PS/PP vidieť viac ako 90% pohltivosť zvuku.

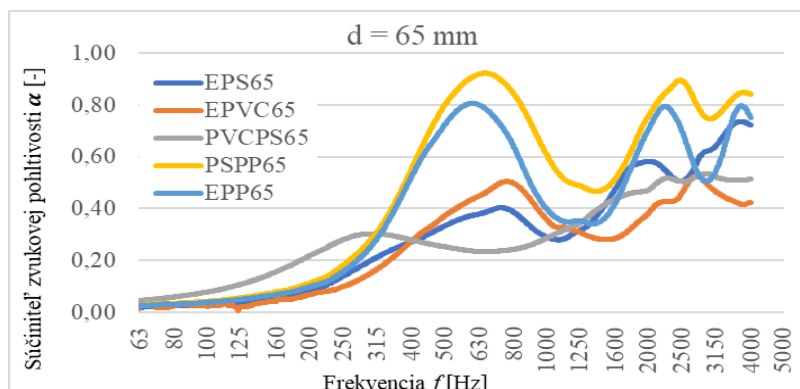
Obr. 2.19 - Graf súčiniteľa zvukovej pohltivosti pre zámes PS/PP



#### POROVNANIE RÔZNYCH MATERIÁLOV PRI ROVNAKEJ HRÚBKE

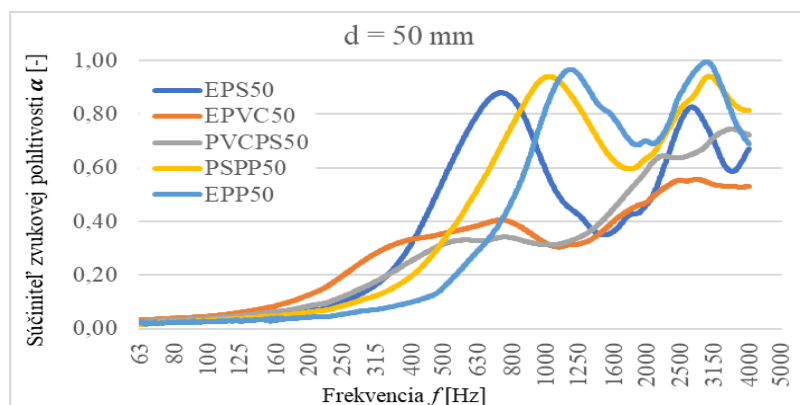
V prípade hrúbky vzoriek 65 mm (Obr.2.20) dosiahli najlepšie pohltivosti zámеси s použitím polypropylénu (PS/PP, EVA/PP), v prípade PS/PP pri frekvencii okolo 700 Hz a následne 2500 Hz dokonca viac ako 90%. Naopak najnižšie hodnoty dosiahli zámеси, ktoré boli tvorené kombináciou väčších granúl s menšími (EVA/PVC, EVA/PS, PVC/PS). V týchto prípadoch predstavovala zvuková pohltivosť len max. 60%. Tieto zámеси nedosiahli ani výraznejšie vrcholy kriviek (priebeh zvukovej pohltivosti bol vyrovnannejší).

Obr. 2.20 - Porovnanie materiálov s hrúbkou 65 mm z hľadiska zvukovej pohltivosti



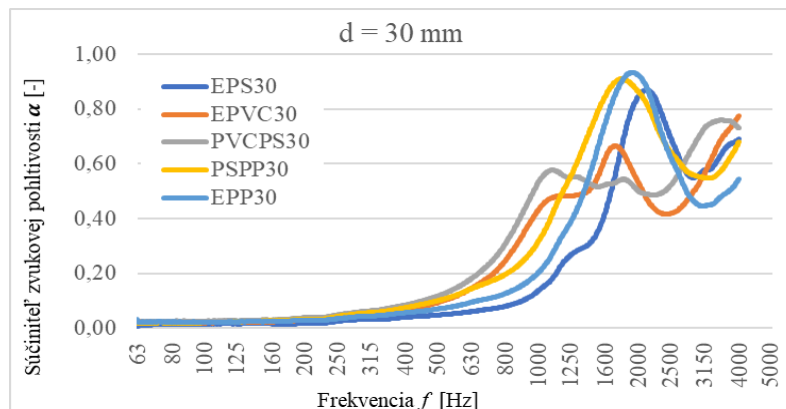
Ako je možné vidieť na Obr.2.21, zo vzoriek s hrúbkou 50 mm dosiahli najlepšiu pohltivosť zámesi s použitím EVA plastu, polypropylénu a polystyrénu (EVA/PP, PS/PP, EVA/PS). Najmä pohltivosť vzoriek EVA/PS sa výrazne zvýšila (a zároveň bol priebeh zvukovej pohltivosti, čo mohlo byť spôsobené zrezaním spodnej časti vzoriek s najväčšou koncentráciou spojiva. Zámes EVA/PP dosiahla pri frekvencii cca 3000 Hz pohltivosť 100% ( $\alpha=1$ ). Zámes EVA/PVC a PVC/PS dosahovala stále nízke hodnoty pohltivosti v rámci celého frekvenčného spektra (cca 30-50%), v tomto prípade teda zrezanie spodnej časti vzoriek nemalo spomínaný zlepšujúci efekt.

Obr. 2.21 - Porovnanie materiálov s hrúbkou 50 mm z hľadiska zvukovej pohltivosti



Na vzorkách s hrúbkou 30 mm (Obr.2.22) je možné vidieť, ako sa priebeh ich zvukovej pohltivosti zjednotil a je možné sledovať rozdiely v pohltivosti jednotlivých materiálov pri frekvenciách 1000-4000 Hz. V tomto prípade boli najvyššie hodnoty pohltivosti všetkých materiálov zaznamenané vo frekvenčnom pásme 1000-2000 Hz. V prípade vzoriek EVA/PVC a PVC/PS však nedošlo ku výraznému zvýšeniu zvukovej pohltivosti ( $\alpha \leq 0,7$ ). V priemere dosahovali spomínané zámesi pohltivosť okolo 50%. Vzorky PS/PP, EVA/PP a EVA/PS dosiahli v prípade zrezania vzoriek na 30 mm aj pravidelný priebeh (krivka s jedným výrazným vrcholom v určitom frekvenčnom pásme).

Obr. 2.22 - Porovnanie materiálov s hrúbkou 30 mm z hľadiska zvukovej pohltivosti



### 3. ZÁVERY

Na základe experimentálnej časti tejto záverečnej práce, je možné konštatovať, že:

- použité organické spojivo 4,4' MDI sa ukázalo ako vhodný typ spojiva do ľahkých betónov s plnivom na báze penových plastov, pri jeho použití sa dosiahli pomerne dobré mechanické, fyzikálne, tepelno-technické vlastnosti, ako aj zvukovú pohltivosť,
- ideálne množstvo spojiva 4,4' MDI na výrobu ľahkých betónov je 0,6 litra ku 8 litrov plniva,
- riedenie organického spojiva 4,4' MDI vodou do výšky 30% nemá negatívny vplyv na tepelno-technické parametre ani na pevnosť v tlaku (napätie pri deformácii), s výnimkou zámesi s použitím EVA plastu, kedy sa súčiniteľ tep. vodivosti navýšil o 50%,
- sledované zámesi dosiahli priemerné objemové hmotnosti 120-560 kg/m<sup>3</sup>; najnižšiu objemovú hmotnosť dosiahla zámes s použitím PS (120 kg/m<sup>3</sup>), najvyššiu hodnotu zámes s PVC (560 kg/m<sup>3</sup>),
- súčiniteľ tepelnej vodivosti sledovaných zámesí bol v rozmedzí 0,0491-0,1017 W/m.K, najnižšiu hodnotu dosiahla zámes s použitím PS (0,0491 W/m.K), najvyššiu hodnotu zámes s PVC (0,1017 W/m.K),
- najvyššiu pevnosť v tlaku (napätie pri deformácii) dosiahla zámes s použitím PVC (0,29-0,41 MPa), v prípade kombinovaného plniva to bola zámes EVA/PVC v pomere 3:1 (0,27-0,36 MPa). Najnižšiu pevnosť v tlaku dosiahla zámes PP (0,02-0,04 MPa) a z kombinovaných zámesí EVA/PS 3:1 (0,04-0,07 MPa),
- v prípade zvukovej pohltivosti sa vzorky s hrúbkou 65 mm správali nehomogénne, vplyvom nerovnomerného rozmiestnenia spojiva vo vzorkách; po zrezaní vzoriek na hrúbku 30 mm sa tento efekt ustálil,
- najvyššiu zvukovú pohltivosť dosiahli kombinované zámesi - EVA/PP a PS/PP (>90%) vo frekvenčnom pásme 1600-2000 Hz pri hrúbke vzoriek 30 mm, najnižšiu zámes PVC/PS a EVA/PVC (≤50%) v celom frekvenčnom spektre pri hrúbke vzoriek 65 mm,
- v prípade kombinovaných plnív v zámesi malo negatívny vplyv na zvukovú pohltivosť kombinovanie väčšej a menšej frakcie.

### 3.1. Prínos záverečnej práce pre prax a vednú oblasť

Záverečná práca poskytla možnosť opätovného využitia penových plastov na výrobu ľahkých betónov, a teda šetrenie životného prostredia. Overila sa možnosť náhrady najpoužívaniejšieho spojiva – cementu – organickým spojivom 4,4'MDI. Zároveň sa stanovila možnosť riedenia použitého spojiva 4,4'MDI vodou, a to až do 30%, čo predstavuje opäť šetrenie životného prostredia.

Prácou boli stanovené mechanické, fyzikálne, tepelno-technické parametre a zvuková pohltivosť ľahkých betónov s použitím vybraných druhov recyklovaných penových plastov ako plniva. Tieto poznatky môžu slúžiť pri výskume využitia ďalších druhov plastov ako plniva do ľahkých betónov. V prípade použitia sledovaných materiálov do exteriérových konštrukcií je potrebné stanoviť nasiakavosť a mrazuvzdornosť týchto materiálov. V prípade použitia recyklovaných plastov do akustických konštrukcií by bolo zaujímavé sledovanie zvukovej pohltivosti s použitím vzduchovej medzery.

Z hľadiska zvukovej pohltivosti je dôležité dodať, že sledované materiály vykazovali výrazné zlepšenie zvukovej pohltivosti po zrezaní spodnej časti vzoriek. Tento efekt spôsobila vysoká koncentrácia spojiva na danom mieste.

### Vybraný zoznam použitej literatúry

- [1] STN EN 206+A2 - Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda.
- [2] GREGOROVÁ V.: Ľahké betóny na báze odpadových plastov. Dizertačná práca, Bratislava, 2017.
- [3] WIKIPEDIA: Methylene diphenyl diisocyanate [Online] [Dátum: 13. 07. 2018]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene\\_diphenyl\\_diisocyanate](https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_diphenyl_diisocyanate)
- [4] ISO 10534-1 - Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio.
- [5] DRAGOMIROVÁ J.: Využitie recyklovaného EVA plastu na výrobu tepelnoizolačných polymérbetónov. In: *Slovenská technická Univerzita v Bratislave SvF KMTI*, 2017, pp.28.  
 Dostupné na: <https://opac.crzp.sk/?fn=docviewChild000CA259>
- [6] STN EN 1793-3/O1 - Zariadenia na zníženie hluku z cestnej dopravy. Skúšobné metódy určovania akustických vlastností. Časť 3: Normalizované spektrum dopravného hluku.

### Zoznam publikačnej činnosti

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 BISKUPIČOVÁ, A. -- UNČÍK, S. -- LEDEREROVÁ, M. Monitoring the impact of the binder on the lightweight concrete properties. *Czech Journal of Civil Engineering*, 4. s. 14--19.

#### **ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch**

ADF01 BISKUPIČOVÁ, A. Ovplyvnenie vlastností ľahkých betónov druhom spojiva. *Mladá veda*, 6. s. 1--6.

ADF02 DAUBNEROVÁ, A. -- GREGOROVÁ, V. Nový druh ľahkých betónov?. *Eurostav*, 23. s. 42--43.

#### **ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS**

ADM01 BISKUPIČOVÁ, A. -- LEDEREROVÁ, M. -- UNČÍK, S. -- RYCHTÁRIKOVÁ, M. -- GLORIEUX, C. Sound absorbing properties of recycled polymers. *Akustika*, s. 39--44.

#### **ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS**

ADN01 BISKUPIČOVÁ, A. -- LEDEREROVÁ, M. -- UNČÍK, S. -- GLORIEUX, C. -- RYCHTÁRIKOVÁ, M. Sound absorption properties of materials based on recycled plastic granule mixtures. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 29. s. 15--19.

#### **AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

AFC01 BISKUPIČOVÁ, A. -- ROOZEN, N. B. -- LEDEREROVÁ, M. -- UNČÍK, S. -- RYCHTÁRIKOVÁ, M. -- GLORIEUX, C. Acoustic characterisation of recycled porous material by means of an impedance tube measurement, varying the air gap behind the sample. In CARLETTI, E. -- CROCKER, M. -- PAWELCZYK, M. -- TŮMA, J. *Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration*. Gliwice, Poland: Silesian University Press, 2021, ISBN 978-83-7880-799-5.

AFC02 DAUBNEROVÁ, A. -- UNČÍK, S. Overovanie vybraných vlastností betónových kompozitov na báze penových plastov. In *Juniorstav 2018: sborník příspěvků. 20. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 25. 1. 2018 [elektronický zdroj]*. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2018, s. 914--919. ISBN 978-80-86433-69-1.

AFC03 DAUBNEROVÁ, A. -- UNČÍK, S. Overovanie vybraných vlastností betónových kompozitov na báze penových plastov. In *Juniorstav 2018: sborník příspěvků. 20. odborná konference doktorského studia. Brno, ČR, 25. 1. 2018 [elektronický zdroj]*. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2018, s. 914--919. ISBN 978-80-86433-69-1.

AFC04 BISKUPIČOVÁ, A. -- UNČÍK, S. Monitoring of selected physical and thermal properties of lightweight concrete based on recycled foam plastics. In *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. Zurich: Trans Tech Publications, 2018, s. 46--50. ISBN 978-3-0357-1361-9.

AFC05 URBÁN, D. -- HÁTAŠ, D. -- RAFAJDUS, P. -- BISKUPIČOVÁ, A. -- LEDEREROVÁ, M. Composite Material Sound Absorption Determination by Means of Standing Wave Tube Measurement. In CHMELÍK, V. -- RYCHTÁRIKOVÁ, M. *ATF 2018*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2018, s. 188--192. ISBN 978-909-031-441-9.

AFC06 LEDEREROVÁ, M. -- GREGOROVÁ, V. -- ŠTEFUNKOVÁ, Z. -- BISKUPIČOVÁ, A. Utilization of waste plastics as a filler in lightweight concrete and their possible application in construction. In CHMELÍK, V. -- RYCHTÁRIKOVÁ, M. *ATF 2018*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2018, s. 133--137. ISBN 978-909-031-441-9.

#### **AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**

AFD01 BISKUPIČOVÁ, A. Predbežná štúdia zvukovej pohltivosti EVA plastu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 71--77. ISBN 978-80-227-5052-3.

AFD02 BISKUPIČOVÁ, A. -- UNČÍK, S. História a vývoj ľahkých betónov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2018, s. 110--114. ISBN 978-80-227-4864-3.

AFD03 BISKUPIČOVÁ, A. -- UNČÍK, S. The influence of binder dilution on the properties of lightweight composites. *Construmat 2018*.

AFD04 DAUBNEROVÁ, A. Sledovanie fyzikálno-mechanických vlastností ľahkého betónu s použitím EVA plastu ako plniva. In ŠTEFUNKOVÁ, Z. *Construmat 2017 - International Conference on Structural Materials*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2017, s. 8--11. ISBN 978-80-227-4689-2.

AFD05 DAUBNEROVÁ, A. Vybrané vlastnosti ľahkých betónov s použitím organického spojiva a penových plastov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2017, s. 232--237. ISBN 978-80-227-4751-6.