

# Zvuková pohltivost materiálů

Lukáš Procházka

---

Bakalářská práce  
2012

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.**  
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**25. května 2012**

Ve Zlíně dne 8. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš PROCHÁZKA**  
Osobní číslo: **T090024**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Zvuková pohltivost materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši týkající se problematiky pohlcování zvuku
2. Popište metody měření činitele zvukové pohltivosti
3. U vybraných materiálů změřte frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti
4. Vyhodnoťte naměřené frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti
5. Citujte použitou literaturu

Příjmení a jméno: Procházka Lukáš

Obor: Technologická zařízení

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 24.5.2012



.....

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

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

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

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

<sup>32)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

<sup>33)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

## **ABSTRAKT**

V této bakalářské práci se budeme zabývat zvukovou pohltivostí materiálů. V teoretické části budeme pojednávat o akustice a základních akustických veličinách. Praktická část pak bude obsahovat popis měření činitele zvukové pohltivosti, přehled materiálů, se kterými jsme experimentovali, a grafické vyhodnocování frekvenčních závislostí vzorků.

Klíčová slova: Akustika, zvuková pohltivost

## **ABSTRACT**

In this Bachelor Thesis, we are going to concern with a sound absorption of materials. In theoretical part we will speculate about acoustics and basic acoustic quantities. Practical part will contain description of measuring a sound absorption coefficient, overview of materials, which we used for experiment and graphical results of material samples frequency dependence.

Keywords: Acoustics, Sound Absorption

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D., za čas, který mi věnoval, nesmírnou trpělivost, užitečné rady a odbornou pomoc po dobu vypracovávání této bakalářské práce.

*„Na konci díla poznáme,*

*čím jsme měli začít.“*

*(Pascal Blaise)*

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



# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY V OBLASTI AKUSTIKY .....</b>	<b>13</b>
1.1 ZVUK (AKUSTICKÉ VLNĚNÍ V ELASTICKÉM PROSTŘEDÍ) .....	13
1.2 HLUK .....	14
1.2.1 Hluk jako škodlivý faktor nejen životního prostředí.....	14
1.2.2 Vliv hluku na člověka .....	15
1.2.3 Příčiny vzniku hluku .....	17
1.2.4 Opatření a metody boje proti hluku .....	17
1.3 ZÁKLADNÍ VELIČINY V AKUSTICE.....	19
1.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ AKUSTICKÝCH VLN .....	19
1.4.1 Rychlost šíření zvukové vlny v tekutinách .....	20
1.4.2 Rychlost šíření zvukových vln v pevných látkách .....	20
1.4.3 Podmínka vzniku vlnění.....	22
1.4.4 Podélné vlnění v bodové řadě .....	22
1.5 AKUSTICKÁ RYCHLOST .....	23
1.6 AKUSTICKÝ TLAK.....	24
1.7 AKUSTICKÝ VÝKON.....	25
1.8 AKUSTICKÁ INTENZITA .....	26
1.9 HUSTOTA AKUSTICKÉ ENERGIE .....	27
<b>2 DECIBELOVÉ VELIČINY V AKUSTICE.....</b>	<b>28</b>
2.1 HLADINY – DEFINICE .....	28
2.2 ZÁKLADNÍ DECIBELOVÉ VELIČINY .....	29
2.2.1 Hladina akustického výkonu .....	29
2.2.2 Hladina akustického tlaku .....	29
2.2.3 Hladina akustické intenzity .....	30
2.3 VZÁJEMNÁ SOUVISLOST ZÁKLADNÍCH DECIBELOVÝCH VELIČIN.....	30
2.3.1 Souvislost hladiny akustického tlaku a hladiny akustické intenzity .....	30
2.3.2 Souvislost hladiny akustického výkonu a hladiny akustického tlaku .....	31
2.3.3 Souvislost hladiny akustického výkonu a hladiny akustické intenzity .....	31
2.3.4 Hladinové vyjádření dalších decibelových veličin.....	31
<b>3 POHLCOVÁNÍ ZVUKU .....</b>	<b>33</b>
3.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ZVUKU .....	33
3.2 ENERGETICKÁ BILANCE PŘI DOPADU ZVUKOVÉ VLNY NA PŘEKÁŽKU .....	33
3.3 ČINITELE ZVUKU .....	34
3.3.1 Činitel zvukové pohltivosti .....	34
3.3.2 Činitel zvukové odrazivosti.....	35
3.3.3 Činitele zvukové průzvučnosti a tepelné přeměny.....	35
3.3.4 Činitel zvukové redukce:.....	36
3.4 METODY MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....	36
3.4.1 Metoda poměru stojaté vlny (ČSN ISO 10534-1).....	36
3.4.2 Metoda dozvukové komory (ČSN EN ISO 354) .....	37

3.4.3	Metoda přenosové funkce (ČSN ISO 10534-2) .....	38
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>ZKOUMANÉ MATERIÁLY .....</b>	<b>41</b>
4.1	PĚNOVÉ POLYMERY .....	42
4.1.1	Polyuretanová (PUR) pěna.....	42
4.1.1.1	PUR pěna (jemné póry) .....	42
4.1.1.2	PUR pěna (polohrubé póry) .....	42
4.1.1.3	PUR pěna (hrubé póry) .....	43
4.1.1.4	PUR pěna (velmi hrubé póry) .....	43
4.1.1.5	Recyklát PUR pěny .....	43
4.1.1.6	PUR pěna (Tvarovaná) .....	44
4.1.1.7	PUR pěna (jednostranně vlnitá) .....	44
4.1.2	Pěnový polystyrén (PS).....	44
4.2	HOMOGENNÍ TUHÉ POLYMERY .....	45
4.2.1	Polyetyltetereftalát (PET).....	45
4.2.2	Polymetylmetakrylát (PMMA) .....	45
4.2.3	Polypropylen (PP) .....	46
4.3	ELASTOMERY .....	46
4.3.1	Černá pryž (jemná struktura) .....	46
4.3.2	Černá pryž (hrubá struktura) .....	46
4.3.3	Zelená pryž .....	47
4.3.4	Hnědá pryž .....	47
4.3.5	Bílá pryž .....	47
4.3.6	Korek s textilním povrchem .....	48
4.4	OSTATNÍ DRUHY MATERIÁLŮ .....	48
4.4.1	Skelná vata .....	48
<b>5</b>	<b>POPIS MĚŘENÍ.....</b>	<b>49</b>
5.1	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A POMŮCKY .....	49
<b>6</b>	<b>NAMĚŘENÉ FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....</b>	<b>52</b>
6.1	SAMOSTATNÉ MATERIÁLY .....	52
6.1.1	Frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti jednotlivých materiálů.....	53
6.1.1.1	Pěnové polymery .....	53
6.1.1.2	Tuhé homogenní polymery .....	57
6.1.1.3	Elastomery .....	58
6.1.1.4	Ostatní druhy materiálů .....	61
6.1.2	Vliv vzduchové mezery .....	62
6.1.3	Vliv tloušťky .....	64
6.1.4	Vliv pórovitosti .....	65
6.1.5	Vliv tvaru povrchu .....	65
6.1.6	Ekonomika recyklátů .....	66
6.2	SENDVIČOVÉ KOMBINACE .....	67
6.2.1	Dvouvrstvé kombinace.....	68
6.2.1.1	Porovnání se samostatnými materiály .....	72
6.2.1.2	Vliv pořadí materiálů .....	74

6.2.1.3	Vliv vzduchové mezery .....	75
6.2.2	Třívrstvé kombinace.....	76
6.2.3	Kombinace dvou vzorků se vzduchovou mezerou uprostřed .....	80
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>86</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	.....	<b>87</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	.....	<b>88</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	.....	<b>91</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	.....	<b>93</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ</b>	.....	<b>94</b>

## ÚVOD

Vzhledem k neustálému zdokonalování nejen dopravní a výrobní techniky, které mají za následek zvýšenou hladinu akustických veličin, je zvláště v dnešní době důležité analyzovat a vhodně navrhnout opatření proti těmto nežádoucím vlivům, neboť mají negativní dopad na životní prostředí a zdraví člověka. Lidé v dnešní době jsou neustále pod vlivem hluku, a aniž by si to uvědomovali, jejich onemocnění mohou pramenit právě z účinků nežádoucího zvuku. Z těchto důvodů se v oblasti akustiky zabýváme činiteli zvuku, z nichž jeden nazýváme koeficientem zvukové pohltivosti a právě na tento se v mé bakalářské práci zaměříme. Cílem inženýrství v oblasti strojní techniky a stavebnictví by dnes měl být správně zvolený kompromis mezi výkonem, cenou a jeho dopadem na okolní prostředí.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY V OBLASTI AKUSTIKY

Dříve, než budeme věnovat kapitulu samotné zvukové pohltivosti a jejímu součiniteli, je potřeba osvojit a vysvětlit si některá základní fakta, jež se týkají oblasti akustiky.

### 1.1 Zvuk (akustické vlnění v elastickém prostředí)

Zvuk je ve své podstatě mechanické kmitání pružného prostředí, a to ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu. Šíří se určitým prostředím konečnou rychlostí, přičemž akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí přibližně 340 m/s a ve vodě cca 1500 m/s, což je rychlost podstatně vyšší. Naše problematika zasahuje do oblasti technické akustiky, kde frekvenční rozsah akustického vlnění odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. To je tedy oblast, kdy vnímáme zvuk sluchem a rozsah frekvence zvuku je od 16 Hz do 20 kHz. Dále rozeznáváme akustické vlnění o kmitočtu menším než 16 Hz, tj. infrazvuk, a větším než 20 kHz, tj. ultrazvuk. [1,2]

Prostřednictvím akustických vln se od zdroje přenáší mechanická energie kmitajících částic mechanickými kmity. Vlnění od zdroje postupuje ve vlnoplochách ve směru zvukového paprsku takzvanou „rychlostí zvuku“. Vlnoplochy jsou plochy v prostoru se stejnými akustickými veličinami a zvukový paprsek je na ně vždy kolmý. Částice prostředí se s postupující akustickou vlnou zhušťují a zředují, kmitají kolem svých rovnovážných poloh a zásadně se nepohybují se šířící se akustickou vlnou. Podle toho, zda částice kmitají ve směru vlnění nebo kolmo k němu, rozdělujeme vlnění na dva druhy [3]:

- Podélné
- Příčné

U plynů a kapalin se vzhledem k jejich pružnosti ve smyslu objemové roztažnosti vyskytuje pouze podélné vlnění. U pevných látek se vlna šíří i podélně i příčně, protože pevné látky vykazují pružnost jak v normálových, tak i tečných napětích. Kombinací těchto deformací vzniká kmitání ohybové. [3]

Jestliže se zvuk jeví jako nepříjemný nebo nežádoucí, pak o něm mluvíme jako o hluku.

## 1.2 Hluk

### 1.2.1 Hluk jako škodlivý faktor nejen životního prostředí

Jak již bylo uvedeno, hlukem rozumíme každý nežádoucí zvuk. Ten je typickým negativním produktem současné doby, ať už kvůli aktivitám člověka nebo pokud se jedná o přírodní projev přírody. Hluk nelze přesněji fyzikálně definovat, vzhledem k tomu, že velice záleží na vztahu jednotlivého člověka ke konkrétnímu zvuku. Z důvodu neustálého zdokonalování strojů, dopravních prostředků, apod. rostou samozřejmě i nežádoucí účinky způsobené právě jejich hlukem. [1,2]

Shrňme si tyto hlavní důvody [2]:

- Zvyšování výkonu strojů a zařízení – hluk roste přímo úměrně zvyšovanému výkonu
- S dobou se mění i princip funkce strojů – náhrada parních strojů za hlučnější diesel-elektrické, rozvoj leteckého průmyslu
- Vylehčování konstrukcí strojů a staveb vedou ke ztrátám zvukoizolačních vlastností
- Zavádění nových druhů strojních zařízení uvnitř budov – čerpadla, klimatizace, výtahy

Z hlediska ochrany životního prostředí a člověka před nadměrným hlukem je tedy nutné věnovat zvýšenou pozornost v oblasti konstruování a výroby strojů a zařízení, pracovního prostředí, venkovního a vnitřního prostoru obytných staveb. [2]

Z hlediska ekonomického budou stroje, zařízení i obytné prostory cenově náročnější. S tím samozřejmě souvisí i ceny zvukových izolací a jejich prvotní aplikování je vždy levnější než dodatečné protihlukové úpravy. [2]

Do této kategorie však spadá i negativní vliv hluku na člověka. Ačkoliv se hluk s ohledem na ochranu životního prostředí řadí hned za znečištění ovzduší, většina lidí nevěnuje příliš pozornosti hluku, se kterým se v praxi běžně setkává, a to právě proto, že se nejeví bezprostředně bolestí. Jeho účinky se kumulují a negativní dopad na lidské zdraví se projeví až po delší době. [1]

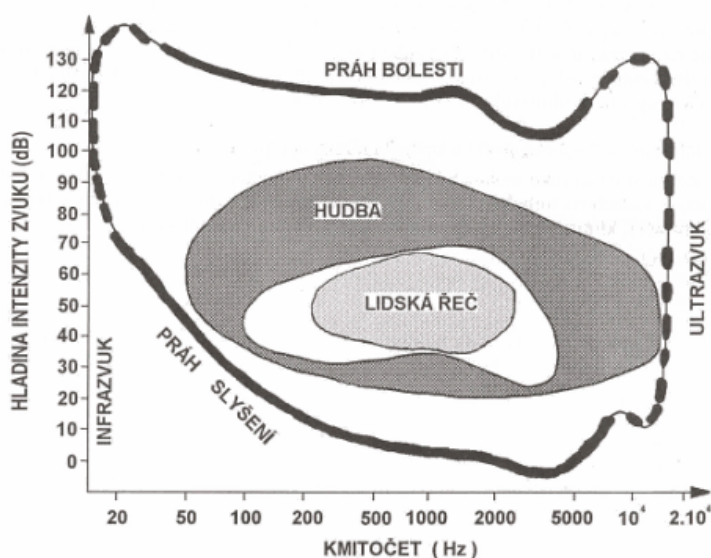
Druh hluku	Řádová velikost hladiny hluku [dB]
Chvění listí	20
Noční ticho ve volné krajině - bezvětrí	40
Tichá ulice ve dne	55
Rozmluva dvou osob (1 m)	60
Zpěv kosa v parku (3 m)	60
Splav na řece (10 m)	70
Ulice s intenzivní dopravou	70 - 80
Jedoucí vlak	90
Rockový koncert	100
Start proudového letadla (300 m)	120

Tabulka 1 - Příkladů hlukových hladin v okolí [4]

### 1.2.2 Vliv hluku na člověka

Jednou z nejzávažnějších vlastností zvuku (hluku) je, že se šíří do velkých vzdáleností, a to jak vzduchem, kapalinou tak i pevnou látkou. Přenos zvukových vln se uskutečňuje dvojitým způsobem:

- Vzduchem – zvukové vlny vytvářejí nepříznivé hlukové poměry nejen v bezprostřední blízkosti v okolí zdroje, ale i na vzdálených místech v prostoru
- Pevnou konstrukcí – v podobě chvění a následného vyzáření do chráněného prostoru v podobě hluku o frekvenci ve slyšitelné oblasti [2]



Obrázek 1 – Kmitočtové a amplitudové složení lidské řeči a hudby [4].



Základním parametrem, který určuje účinek hluku, je jeho intenzita, případně akustický tlak. Člověk se necítí dobře v prostředí, kde je nezvykle nízká hladina hluku. Hodnoty akustického tlaku A okolo 20 dB považuje člověk za hluboké ticho a nepříjemný stav. [3]

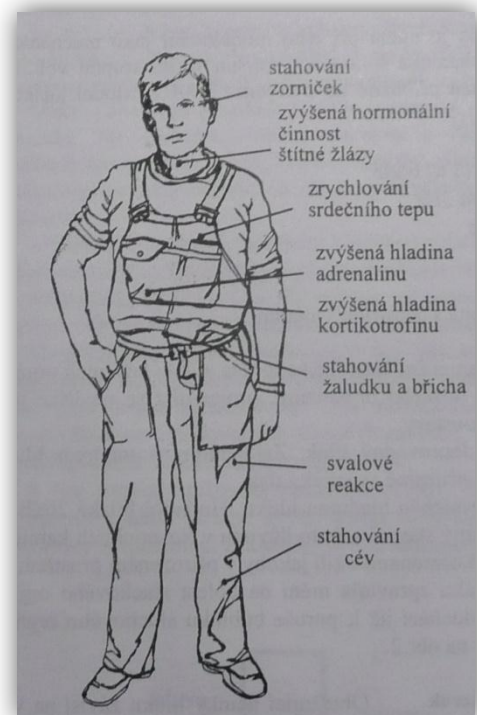
Hladinu 30 dB hodnotí lidé jako příjemné ticho. Od 65 dB výše se začínají již nepříznivě projevovat účinky hluku zejména změnami vegetativních reakcí. Při trvalém pobytu v prostředí, kde hladina akustického tlaku A převyšuje 85 dB, již vznikají trvalé poruchy sluchu a ve větší míře se projevuje negativní dopad na vegetativní systém i celou nervovou soustavu. Taková hladina akustického tlaku byla naměřena na některých místech hlavního města Prahy. Okolo 130 dB je pro člověka tzv. práh bolesti, kdy se účinek zvuku mění na bolest sluchového orgánu. K protržení ušního bubínku dochází při hladině zhruba 160 dB. [1]

Obtěžující účinky hluku závisí na [3]:

- Na intenzitě a frekvenci
- Na době trvání a šířce frekvenčního pásma
- Na rozdílu mezi hlukem zdroje a hlukem pozadí
- Na frekvenci přerušování
- Na impulzivitě hluku a jeho neočekávanosti
- Na osobních dispozicích člověka a jeho vztahu ke zdroji hluku

Mimosluchové účinky hluku [3]:

- Podráždění vegetativního a nervového systému (zvýšená tepová frekvence srdce, zvýšený krevní tlak, zhoršení látkové výměny, organizmus ve stresu).
- Poruchy spánku, jeho nedostatečná hloubka a délka trvání, zhoršená regenerace organizmu.
- Psychické poruchy, podrážděnost, apatie, celková nervozita a bolesti v zažívacím traktu.
- Porucha výkonnosti, snížení pozornosti a produktivity práce, zvýšení reakční doby, což ovlivňuje množství pracovních úrazů.



Obrázek 2 – Mimosluchové účinky hluku (převzato z [3]).

### 1.2.3 Příčiny vzniku hluku

Nepříznivé tendence růstu hlučnosti zůstávají prozatím ve venkovním prostoru, zejména v ulicích měst a okolí dopravních magistrál. Při snižování hluku v oblasti konstrukce a výroby strojů je třeba umět rozeznat pravou příčinu vzniku hluku. Jako zdroje hluku se někdy jeví celá velká zařízení nebo stroje. Skutečnost je však taková, že vyzařování hluku pochází z určitých detailů. Rozlišujeme dvě základní příčiny vzniku akustické energie [1]:

- První případ představuje chvějící se povrch tuhých těles. Tyto kmity se přenášejí na okolní vzduch a s tím spojená akustická energie obvykle souvisí s rozměry zdroje a jeho charakteristickými veličinami. Kmitání způsobené buď nevyvážeností rotujících částí, vzájemnými nárazy mechanismů nebo nerovnoměrným přenosem sil je základní příčinou vzniku hluku. [1]
- Druhou, neméně závažnou příčinou vzniku rušivého zvuku, je neustálé proudění plynného nebo kapalného prostředí v technických zařízeních. Ta část prostoru, kde dochází k největším změnám rychlosti a objemu a kde existuje neustálené proudění, se jeví jako vlastní zdroj. Typickým příkladem tohoto druhu zdroje hluku jsou čerpadla, ventilátory, potrubní armatury, vypouštěcí ventily atd. [1]

Velmi hlučné stroje obvykle vlastní oba druhy zdroje hluku. Příkladem je elektromotor, který působí hluk jak chvěním, tak jeho ventilačním zařízením.

### 1.2.4 Opatření a metody boje proti hluku

Při snižování hluku je třeba se soustředit zejména na oblast výroby a použití strojů, kde se mohou podnikat nejúčinnější opatření. Nejlepších výsledků dosáhneme za použití všech dostupných opatření při minimálních nákladech. Způsoby boje proti hluku můžeme rozdělit do několika metod [1]:

- **Redukce hluku ve zdroji:**

Tento způsob boje s hlukem nám dává nejúčinnější opatření a je také finančně mnohem výhodnější než opatření dodatečná. Metoda spočívá v redukci hluku přímo u zdroje, což se realizuje již při konstrukci a stavbě strojů, technologických a dopravních zařízení, dopravních prostředků, apod. Příkladem této metody může být nahrazení technologického úkonu jiným, méně hlučným. Naneštěstí v mnoha případech nemůžeme navrhovat stroje zcela bezhlučné, protože zvuk vyzařovaný strojním zařízením může sloužit k indikaci technického stavu stroje. [1]

- ***Metoda dispozice:***

Metoda je založena na vhodném umístění zdroje hluku vzhledem ke chráněnému a méně hlučnému prostoru. Na to je třeba pamatovat obzvláště při územním plánování, projekci průmyslových závodů, letišť či dopravních tepen, a to tak, aby hlučné provozy nepříznivě neovlivňovaly akustickou pohodu ve chráněných prostorech, jako jsou nemocnice, školská zařízení, jesle, rekreační oblasti a jiné. Uvnitř budov to znamená situovat chráněné místnosti na straně odlehlé od místnosti se zdrojem hluku. [1]

- ***Metoda izolace:***

Spočívá ve zvukovém odizolování hlučného stroje, zařízení nebo celého hlučného prostoru od prostoru chráněného. Touto problematikou se zabývá zejména stavební akustika, která využívá výpočtů k navrhování a stavbě zvukoizolačních příček, stropů, krytů apod. Ve strojírenství této metody využíváme v případech, kdy již není možnost snížení hluku přímo ve zdroji. Hlučné stroje se dávají pod zvukoizolační kryty nebo zákryty, jejichž hlavním účelem je zamezit šíření hluku do okolního prostředí. [1]

- ***Aplikace poznatků prostorové akustiky s využitím zvukové pohltivosti:***

Zvuková pohltivost je vlastnost některých materiálů a konstrukcí, jejichž úkolem je pohlcovat akustickou energii a měnit ji v teplo. Této metody se využívá při snižování hlučnosti uvnitř místností a v určitých akusticky náročných prostorech. O zvukové pohltivosti budeme podrobně hovořit později. [1]

- ***Použití osobních ochranných pomůcek:***

Poslední metoda boje proti hluku, kterou uplatňujeme teprve tehdy, jestliže všechny předcházející uvedené metody nebylo možno z určitých důvodů použít, nebo jsme jimi nebyli schopni dostatečně snížit hlukový účinek. V těchto případech by měl pracovník povinně používat osobních protihlukových pomůcek, jako jsou různé tlumící zátky vkládané do ucha, sluchátkové chrániče a přilby. [1]

Nejllepších výsledků při snižování hlučnosti dosáhneme vhodnou kombinací výše uvedených metod. Při plánování a použití technických opatření proti hluku je ale třeba také uvažovat cenovou dostupnost. Tam, kde byla v projektu opomenuta hluková otázka, se náklady na dodatečná opatření prudce zvyšují a velmi překračují částku potřebnou k realizování běžného projektu. [1]

### 1.3 Základní veličiny v akustice

Důležitým parametrem určujícím vlastnosti zvuku je tzv. vlnová délka  $\lambda$  [m], která je definována jako vzdálenost dvou po sobě časově následujících např. maxim kmitů vlny u sledovaného vlnění. Zjednodušeně je to vzdálenost mezi dvěma vlnoplochami, jež mají stejné akustické stavy kmitajících částic. Dále pak můžeme konstatovat, že

jde o vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jednoho kmitu, tedy periodu  $T$ . Jestliže se akustická vlna šíří rychlostí zvuku  $c$  a vlnění je s kmitočtem  $f$ , pak pro vlnovou délku  $\lambda$  platí vztah: [3]

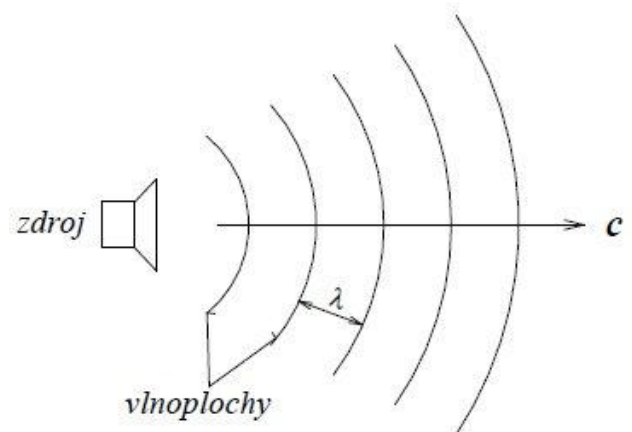
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{T} \quad [m] \quad (1)$$

Kde:  $f$  [Hz] – frekvence vlnění

$c$  [m.s<sup>-1</sup>] – rychlost šíření vlnění

$T$  [s] – perioda vlnění

$\lambda$  [m] – vlnová délka (délka vlny)



Obrázek 3 – Šíření zvuku od zdroje v pružném prostředí (převzato z [5]).

### 1.4 Rychlost šíření akustických vln

Již víme, že v plynech a kapalinách se šíří pouze vlnění podélné, které je provázáno zhušťováním a zředováním částic prostředí. V pevných látkách se navíc šíří vlnění příčné. Kombinací podélných a příčných vln vzniká ohybové vlnění. Každé jednotlivé vlnění se šíří rychlostí, kterou označujeme [3]:

$c_L$  – pro vlnění podélné

$c_T$  – pro vlnění příčné (kolmé) [3]

$c_B$  – pro vlnění ohybové.

#### 1.4.1 Rychlost šíření zvukové vlny v tekutinách

V tekutinách (plyny, kapaliny) se akustické vlny šíří rychlostí, pro kterou platí vztah

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

Kde  $K$  [Pa] je modul objemové pružnosti kapaliny,  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] je hustota prostředí.

Pro plyny lze vztah upravit na tvar

$$c \equiv c_L = \sqrt{\mu \frac{p_b}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Kde:  $\mu$  [-] – Poissonova konstanta

$p_b$  [Pa] – barometrický tlak [3]

prostředí	vzduch 20°C	dusík	kyslík	vodní pára	voda 13°C
rychlost zvuku [m.s <sup>-1</sup> ]	344	336	317	405	1440

Tabulka 2 - Rychlosti zvuku některých plynů a tekutin [3]

#### 1.4.2 Rychlost šíření zvukových vln v pevných látkách

Určování rychlosti šíření akustického vlnění v pevných látkách je obecně vzato velice složitá úloha, ve které je nutno v příslušných vztazích zahrnovat i vliv kontrakce materiálu ve formě Poissonova poměru. [3]

$$\mu = \frac{E-G}{2G} \quad [-] \quad (4)$$

Kde:  $E$  [Pa] – modul pružnosti materiál v tahu

$G$  [Pa] – modul pružnosti ve smyku [3]

Potom lze odvodit vztahy pro:

a) **Podélné vlny**

- V tenkých tyčích

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

- V desce

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6)$$

prostředí	hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	modul pružnosti E [Pa]	rychlost zvuku $c_L$ [m.s <sup>-1</sup> ]	akustická impedance Z [Ns.m <sup>-3</sup> ]
pryž měkká	900	4,4.10 <sup>4</sup>	70	6,3.10 <sup>4</sup>
pryž tvrdá	1100	2,2.10 <sup>9</sup>	1400	1,5.10 <sup>6</sup>
ocel	7850	2,6.10 <sup>11</sup>	5750	4,5.10 <sup>7</sup>
hliník	2700	6,2.10 <sup>10</sup>	4800	1,3.10 <sup>7</sup>
olovo	11400	2,3.10 <sup>10</sup>	1410	1,6.10 <sup>7</sup>
beton	2300	2,2.10 <sup>10</sup>	3100	7,1.10 <sup>6</sup>
cihly	1150	1,6.10 <sup>10</sup>	2800	5,6.10 <sup>6</sup>
silon	2000	1,8.10 <sup>9</sup>	1250	1,4.10 <sup>6</sup>

Tabulka 3 - Rychlost zvuku podélného vlnění některých pevných látek [3]

b) **Příčné vlny**

Vztah je obdoba (5), pouze dojde k záměně modulů pružnosti.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

c) **Ohybové vlny**

Z hlediska vyzařování a šíření zvuku je ohybové vlnění ze všech nejnebezpečnější. Dochází při něm totiž k výraznému přenosu energie z kmitajícího povrchu tělesa (stroje) do okolního prostředí, ať už kapalného nebo vzdušného. Rychlost šíření ohybových vln je závislá na:

- Druhu materiálu
- Rozměru tyče
- Frekvenci vlnění šířeného v tyči

$$c_B = \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I}{\bar{m}}}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

Kde:  $I [m^4]$  – moment setrvačnosti průřezu tyče

$f [Hz]$  – frekvence vlnění [3]

$\bar{m} [kg \cdot m^{-1}]$  – hmotnost jednotkové délky tyče.

### 1.4.3 Podmínka vzniku vlnění

Při návrhu protihlukových opatření strojních součástí a konstrukcí si často pokládáme otázku, jaký druh akustického vlnění se bude určitým konstrukčním prvkem šířit. Hlavní podmínka vzniku vlnění je, aby délka  $l [m]$  materiálu byla rovna minimálně poloviční délce vlny. Pro podélné vlnění tedy musí platit [1,3]

$$l \geq \frac{\lambda_L}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad [m] \quad (9)$$

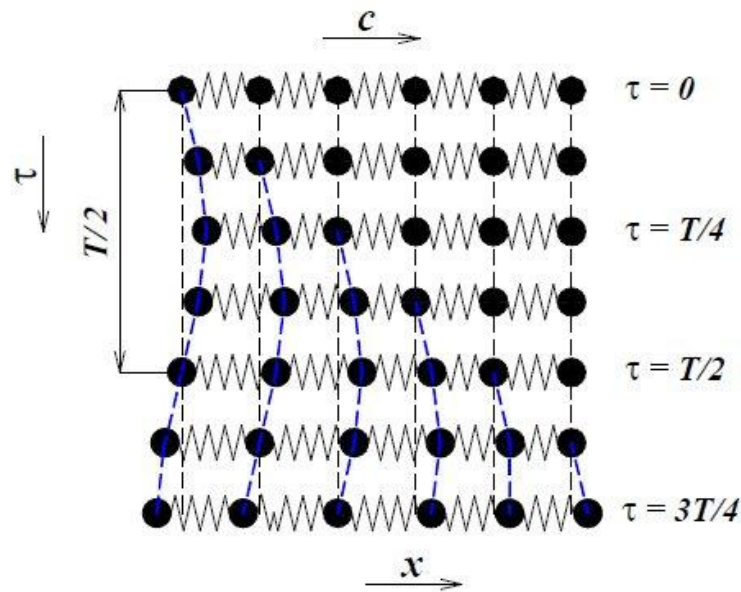
### 1.4.4 Podélné vlnění v bodové řadě

Nejjednodušší vlnění v prostoru je ve směru jedné souřadné osy. V tomto případě se jedná o podélné vlnění v bodové řadě. Jednotlivé hmotné body v prostředí plynném nebo kapalném se vzájemně ovlivňují mezimolekulárními silami. Tyto síly jsou na obrázku znázorněny pružinkami a v počátečním stavu jsou všechny stejně stlačeny. [5]



Obrázek 4 – Bodová řada bez deformací (převzato z [5]).

Jestliže dojde k vychýlení např. prvního bodu řady, dojde k šíření akustické vlny. Od tohoto bodu se dále přenáší rozruch konečnou rychlostí šíření zvuku  $c$  v daném prostředí. Šíří-li se akustická vlna prostředím, jsou vzdálenosti mezi částicemi zmenšovány nebo naopak zvětšovány. Na obrázku 5 je znázorněn průběh šíření akustické vlny v čase. Podobně můžeme zakreslit i kmitání částic příčné vlny, kdy je rovina kolmá na směr šíření akustického signálu. [5]



Obrázek 5 – Vývoj akustické vlny v bodové řadě (převzato z [5]).

V technické akustice se výchylka hmotného bodu, který přenáší akustický signál značí písmenem  $u$ , a její časová závislost se znázorňuje následným vztahem

$$u = u_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad [m] \quad (10)$$

Kde:  $u$  [m] – akustická výchylka

$u_0$  [m] – amplituda akustické výchylky

Jestliže se v homogenním prostředí má šířit rozruch, rychlost šíření zvuku bude konstantní. Okamžitá akustická výchylka ve vzdálenosti  $x$  od počátku je děj opožděný v daném místě  $x$  o čas  $\Delta\tau$  potřebný k uražení této dráhy.

$$\Delta\tau = \frac{x}{c} \quad [s] \quad (11)$$

Potom je akustická výchylka kmitajícího bodu dána rovnicí

$$u = u_0 \sin \omega \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right) \quad [m] \quad (12)$$

## 1.5 Akustická rychlost

Tak nazýváme rychlost, kterou kmitají jednotlivé částičky prostředí, jímž se šíří akustická vlna. Je důležité si uvědomit, že akustická rychlost  $v$  a rychlost šíření zvuku  $c$  jsou dvě naprosto odlišné veličiny. Vztah pro výpočet akustické rychlosti je dán první parciální derivací akustické výchylky (12) podle času. [5]



$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \omega u_0 \cos \omega \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right) \quad (13)$$

Kde součin amplitudy akustické výchylky  $u_0$  a kruhové frekvence  $\omega$  dává amplitudu akustické rychlosti  $v_0$ . [5]

$$v_0 = \omega u_0 \quad (14)$$

## 1.6 Akustický tlak

Zhušťováním a zředováním kmitajících částic prostředí dochází v plynech a kapalinách k zvýšení či snížení tlaku. Z toho, že při šíření vln se celkový tlak v daném prostředí mění, tedy kolísá okolo původního statického či barometrického tlaku v ovzduší. [3]

Akustický tlak  $p$  [Pa] je považován za odchylku celkového tlaku (vzduchu, kapaliny) od tlaku statického při vlnění v daném prostředí. Akustický tlak je nasuperponován na barometrický tlak  $p_b$  a při frekvenci  $f$  a fázovém posuvu  $\varphi$  má tvar harmonické funkce. [3]

$$p_c = p_b + p(t)$$

kde

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) = p_0 \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (15)$$

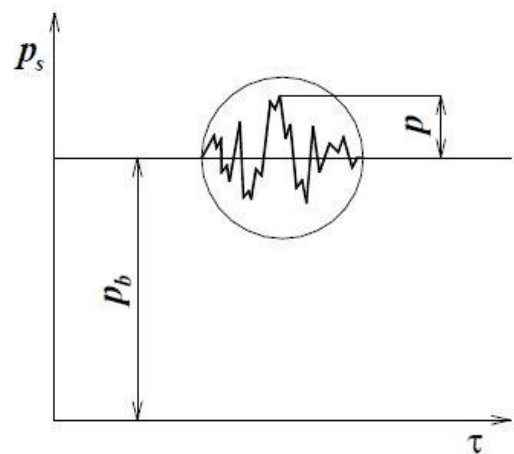
Kde:  $p_0$  – amplituda akustického tlaku

$\varphi$  – fázový posun

Efektivní hodnota akustického tlaku je

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad [Pa] \quad (16)$$

Akustický tlak je jednou ze dvou akustických veličin, kterou inženýrská akustika měří, protože lidské ucho, přesněji bubínek, je citlivý na tlak vzduchu obecně, a z toho vyplývá, že i na tlak akustický. Lidské ucho je vlastně přizpůsobeno pro registraci odchylek tlaku vzduchu od příslušného barometrického tlaku. Mladý člověk může zachytit velmi malou změnu akustického tlaku asi od 20  $\mu$ Pa, což je nepatrná hodnota oproti atmosférickému tlaku, jenž činí zhruba 101,3.10<sup>3</sup> Pa. [3]



Obrázek 6 – Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu (převzato z [5]).

## 1.7 Akustický výkon

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Množství akustické energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, nazýváme *akustickým výkonem*  $P$  [W]. [1]

$$P = \frac{dE}{dt} \quad [W] \quad (17)$$

Kde:  $E$  [J] – Akustická energie

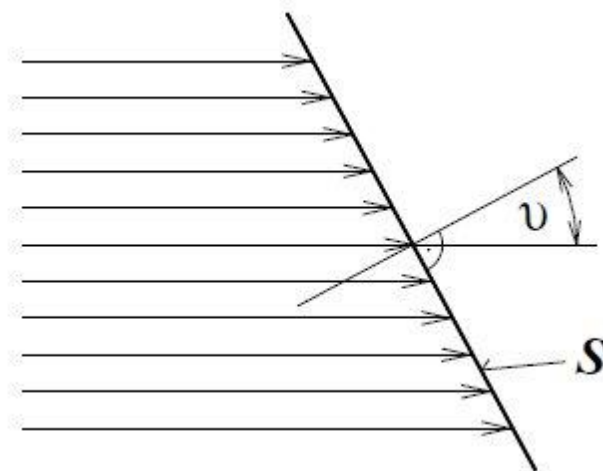
Vztáhneme-li tento výkon na jednotku plochy, kterou je přenášen, zavedeme pojem *měrný akustický výkon*  $N$  [W.m<sup>2</sup>] nebo také akustická intenzita, která bude mít ve zjednodušeném případě stejného akustického stavu, ve všech bodech uvažované rovinné vlny tvar [1,3]

$$N = \frac{P}{S \cdot \cos \vartheta} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (18)$$

Kde:  $P$  [W] – akustický výkon

$S$  [m<sup>2</sup>] – plocha

$\vartheta$  [°] – úhel mezi zvukovým paprskem a měřicí plochou



Obrázek 7 – Šíření rovinné vlny na plochu  $S$  (převzato z [5]).

Ze základů mechaniky víme, že výkon je dán součinem síly a rychlosti, přičemž k získání tvaru pro akustický výkon nyní dosadíme za sílu součin akustického tlaku a plochy, na kterou působí. [1]

$$P = F \cdot v = p \cdot v \cdot S \quad [W] \quad (19)$$

Pokud zvolíme polohu měřicí plochy tak, aby byla kolmá na zvukové paprsky, bude  $\cos \vartheta = 1$ . Potom lze pro akustickou intenzitu psát [1]

$$N = p \cdot v \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (20)$$

## 1.8 Akustická intenzita

Intenzita zvuku je závislá na měrném akustickém výkonu  $N$  a je dána rovnicí [5]

$$I = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T N d\tau \quad (21)$$

Kde  $T$  je doba integrace, která je rovna jedné periodě v případě harmonických signálů. Pro rovinnou vlnu bude tedy vztah vypadat následovně [5]

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot u_0^2 = \frac{p_0^2}{2 \cdot \rho \cdot c} = v_{ef} \cdot p_{ef} \quad (22)$$

Kde:  $p_{ef}$  [Pa] – efektivní hodnota akustického tlaku

$v_{ef}$  [m.s<sup>-1</sup>] – efektivní hodnota akustické rychlosti [5]

Tyto efektivní hodnoty jsou dány vztahem

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

V technické akustice nelze měřit akustickou rychlost, zato můžeme spolehlivě měřit akustický tlak. U rovinné vlny využíváme té skutečnosti, že poměr mezi výše zmíněným akustickým tlakem akustickou rychlostí je konstantní.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c = konst. \quad (25)$$

Kde:  $Z$  [Ns.m<sup>-3</sup>] – měrný vlnový odpor prostředí (akustická impedance), v němž se šíří akustická vlna

Dosazením rovnice (25) do (22) získáme vztah pro výpočet intenzity zvuku u rovinné vlny

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad (26)$$

## 1.9 Hustota akustické energie

Hustota akustické energie je definována akustickou energií, která je obsažena v objemové jednotce prostředí. Je dána vztahem

$$w = \frac{dE}{dV} \quad [J \cdot m^{-3}] \quad (27)$$

Kde:  $w$  [ $J \cdot m^{-3}$ ] – hustota akustické energie

Pro celkovou energii kmitajícího bodu platí vztah

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot y_0^2 \cdot \omega^2 \quad [J] \quad (28)$$

Po dosazení rovnice (27) do (26) lze hustotu akustické energie vyjádřit rovnicí

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \omega^2 \quad [J \cdot m^{-3}] \quad (29)$$

## 2 DECIBELOVÉ VELIČINY V AKUSTICE

V úvodní kapitole jsme si představili a osvojili základní akustické veličiny, nicméně v praxi se tyto veličiny mění o mnoho řádů. *Akustický výkon  $P$*  může dosahovat hodnot od  $10^{-9}$  W (tichý šepot) až do  $10^6$  W (velký raketový motor). Podobné rozmezí platí i u ostatních akustických veličin a právě z tohoto důvodu, pro lepší názornost člověka, byly zavedeny tzv. *hladiny akustických veličin* neboli *decibelové veličiny*. [5]

### 2.1 Hladiny – definice

Jak již bylo zmíněno v kapitole **1.6**, pro zdravého člověka je hodnota akustického tlaku (prahová hodnota slyšení) při frekvenci 1000 Hz cca 20  $\mu$ Pa. Tuto hodnotu bereme jako referenční a odvozují se od ní zbylé referenční hodnoty akustických veličin. Prahová hodnota bolesti člověka činí okolo 100 Pa, což je oproti spodní prahové hodnotě poměr přibližně 1:1000 000. Je to značné rozmezí hodnot a co víc, lidské ucho vnímá zvukový podnět ne lineárně, ale jako logaritmus tohoto podnětu. [3]

Dále pak na základě Weber-Fechnerova zákona se tedy zavedly praktičtější vyjádření akustických parametrů, a to za pomoci dekadického logaritmu poměru sledované veličiny ku příslušné referenční hodnotě. Takové vyjádření akustických veličin nazýváme *hladiny akustických veličin* a obecně jsou definovány následovně [1,3]

$$L = \log \frac{A}{A_0} = \frac{\text{hodnota porovnávané veličiny}}{\text{hodnota referenční}} \quad [dB] \quad (30)$$

Jednotkou je *bel* [B], ale vzhledem ke značné šířce této veličiny používáme *decibel* [dB], jakožto hodnotu desetkrát menší. [3]

Hladiny akustických veličin se udávají jako:

- Pásmové hladiny, odpovídající určitému frekvenčnímu pásmu [3]
- Celkové hladiny pro celkové slyšitelné frekvenční pásmo

## 2.2 Základní decibelové veličiny

### 2.2.1 Hladina akustického výkonu

Akustický výkon se zpravidla vyznačuje na štítku základních parametrů stroje. [3]

Používáme index W nebo P, hladina akustického výkonu  $L_W$  [dB] je dána vztahem [3,5]

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad [dB] \quad (31)$$

Kde:  $W$  [W] – sledovaný akustický výkon

$W_0$  [W] – referenční hodnota akustického výkonu,  $W_0 = 10^{-12}$  W

Z rovnice (30) je zřejmé, že pokud se zvýší hodnota *akustického výkonu* o jeden řád, zvýší se *hladina akustického výkonu* o 10 dB. [5]

Pokud je rozdíl referenčních hodnot  $10^9$  W – 1 W, pak je v decibelové stupnici konstantní rozdíl 120 dB. Na základě tohoto poznatku můžeme psát, že [1]

$$L_W = 10 \cdot \log W + 120 \quad [dB] \quad (32) \quad [3]$$

### 2.2.2 Hladina akustického tlaku

Hladina akustického tlaku  $L_P$  [dB] je definována vztahem [5]

$$L_P = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (33)$$

Kde:  $p$  [Pa] – efektivní hodnota sledovaného akustického tlaku

$p_0$  [Pa] – referenční hodnota akustického tlaku,  $p_0 = 10^{-5}$  Pa

Přičemž referenční hodnota *akustického tlaku* je taková hodnota, kterou je ještě schopen zaznamenat nepoškozený sluchový orgán zdravého člověka. Z příslušné rovnice opět vyplývá, že pokud se zvýší hodnota *akustického tlaku* o jeden řád, zvýší se hodnota *hladiny akustického tlaku* o 20 dB. [5]

Pro referenční hodnotu *akustického tlaku*  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa bude *hladina akustického tlaku*

$$L_P = 20 \cdot \log p + 94 \quad [dB] \quad (34)$$

### 2.2.3 Hladina akustické intenzity

Hladina intenzity zvuku je definována rovnicí [3]

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [dB] \quad (35)$$

Kde:  $I$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] – měřená akustická intenzita

$I_0$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] – referenční hodnota akustické intenzity, běžně  $I_0 = 10^{-12}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Pro tuto referenční hodnotu můžeme psát [3]

$$L_I = 10 \cdot \log I + 120 \quad [dB] \quad (36)$$

Z rovnice (34) vyplývá, že pokud se zvýší hodnota *akustické intenzity* o jeden řád, pak se zvýší *hladina akustické intenzity* o 120 dB. [3]

Je nutno podotknout, že nelze zaměnit *hladiny akustického výkonu zdroje*, což je konstantní hodnota (popřípadě *hladinu akustického tlaku*) s *hladinou akustické intenzity*, která je závislá na vzdálenosti od zdroje. [3]

## 2.3 Vzájemná souvislost základních decibelových veličin

### 2.3.1 Souvislost hladiny akustického tlaku a hladiny akustické intenzity

Dosadíme-li vztahy pro výpočet akustické intenzity (25) do vztahu pro výpočet hladiny akustické intenzity (34), pak můžeme psát, že [5]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho_0 \cdot c_0}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 \cdot c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho_0 \cdot c_0} \quad [dB] \quad (37)$$

Pokud se budeme pohybovat v oblasti běžných klimatických podmínek, pak pro poslední člen rovnice (36) platí [5]

$$10 \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho_0 \cdot c_0} = -0,2 \quad [dB] \quad (38)$$

Na základě tohoto poznatku tedy lze rovnici (36) psát ve tvaru [5]

$$L_I = L_P - 0,2 \cong L_P \quad [dB] \quad (39)$$

Aniž bychom podstatně ovlivnili přesnost výpočtů a měření zvuku, můžeme na základě měření *hladiny akustického tlaku* přímo stanovit *hladinu akustické intenzity*. Závěrem tedy můžeme říct, že hladina akustického tlaku  $L_P$  a hladina akustické intenzity  $L_I$  jsou přibližně stejné. [5]

### 2.3.2 Souvislost hladiny akustického výkonu a hladiny akustického tlaku

Mějme zdroj zvuku  $Z$  o akustickém výkonu  $W$ , který vyzařuje akustickou energii rovnoměrně do všech směrů. Obklopíme-li tento zdroj měřicí plochou  $S$  s intenzitou zvuku  $I$ , pak projde veškerý akustický výkon plochou  $S$  a platí vztah [5]

$$W = I \cdot S \quad [W] \quad (40)$$

Kde:  $I$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] – je střední akustická intenzita měřeného povrchu

$S$  [ $m^2$ ] – je celkový povrch imaginární měřicí plochy kolem zdroje

Nyní dosadíme tento vztah do rovnice pro hladinu akustického výkonu (30)

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I \cdot S}{I_0 \cdot S_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad [dB] \quad (41)$$

Zvolíme-li velikost referenční plochy v posledním členu rovnice tak, že  $S_0 = 1m^2$ , potom získáme závislost *hladiny akustického výkonu* na *hladině akustického tlaku*. [5]

$$L_W = L_p + 10 \log S \quad [dB] \quad (42)$$

Respektive

$$L_p = L_W - 10 \log S \quad [dB] \quad (43)$$

Je zřejmé, že *hladina akustického tlaku*  $L_p$  klesá s rostoucí vzdáleností *plochy*  $S$  od bodového zdroje zvuku s *hladinou akustického výkonu*  $L_W$ . [5]

### 2.3.3 Souvislost hladiny akustického výkonu a hladiny akustické intenzity

Vzhledem k tomu, že *hladiny akustického výkonu* a *intenzity zvuku* jsou podle výše uvedeného vztahu (38) přibližně stejné, pak musí mezi *hladinou akustického tlaku* a *akustické intenzity* analogicky platit.

$$L_I = L_W - 10 \log S \quad [dB] \quad (44)$$

*Hladina intenzity zvuku*  $L_I$  klesá s rostoucí vzdáleností od bodového zdroje zvuku  $Z$  s *hladinou akustického výkonu*  $L_W$ .

### 2.3.4 Hladinové vyjádření dalších decibelových veličin

Mimo základní decibelové veličiny se používají i další hladinové veličiny. Přehled všech decibelových veličin používaných v oblasti akustiky je uveden v následující tabulce.



Veličina	Definice hladiny	Referenční hodnota
<i>Akustický výkon</i>	$L_W = 10 \log(W/W_0)$	$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$
<i>Akustická intenzita</i>	$L_I = 10 \log(I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$
<i>Akustická energie</i>	$L_E = 10 \log(E/E_0)$	$E_0 = 10^{-12} \text{ J}$
<i>Hustota akustické energie</i>	$L_w = 10 \log(w/w_0)$	$w_0 = 10^{-12} \text{ Jm}^{-3}$
<i>Akustický tlak vzduch</i>	$L_p = 20 \log(p/p_0)$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
<i>Akustický tlak jiná prostředí</i>	$L_p = 20 \log(p/p_0)$	$p_0 = 10^{-6} \text{ Pa}$
<i>Akustická rychlost</i>	$L_v = 20 \log(v/v_0)$	$v_0 = 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$

*Tabulka 4 – Přehled vyjádření decibelových veličin užívaných v akustice*

### 3 POHLCOVÁNÍ ZVUKU

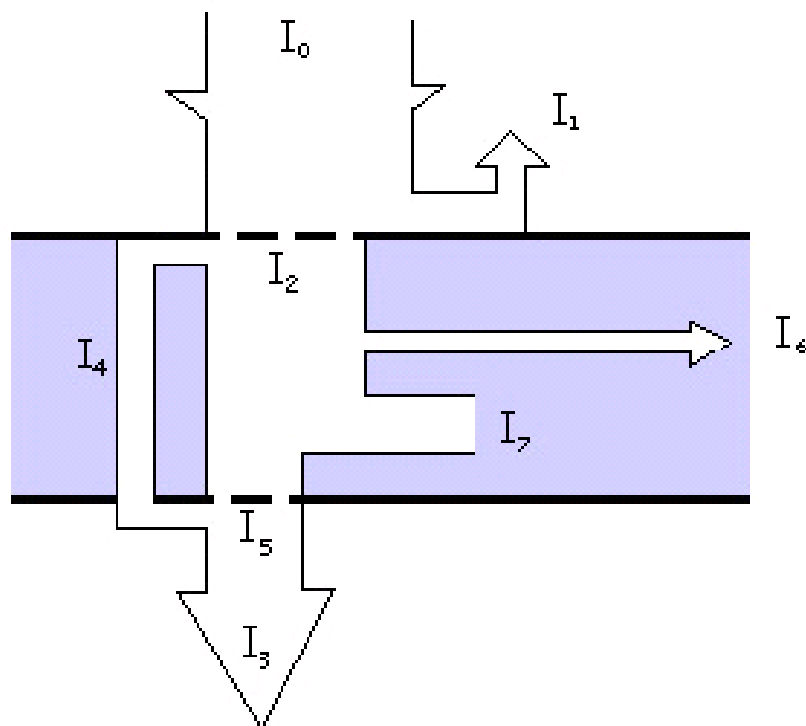
#### 3.1 Fyzikální vlastnosti zvuku

Zvuk se v příslušném akustickém prostředí šíří vlněním jeho částic. Akustické vlnění je v reálném prostředí např. v atmosféře vedle poklesu intenzity, ovlivňováno řadou dalších faktorů. Příkladem mohou být teplotní a rychlostní gradienty akustického prostředí, kdy se mění jejich směr vlnění, turbulence akustické pole deformuje a viskozita tekutiny (plyn, kapalina) způsobuje absorbování části akustické energie. Absorpce zvuku ve vzduchu se mění s frekvencí, vlhkostí a teplotou podle poměrně složitých vztahů. Absorpce zvuku bude tím větší, čím větší bude teplota vzduchu a bude menší se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu. Těchto vlastností zvuku se uplatňuje při jeho šíření např. v mlze nebo smogu. V pracovním a reálném životním prostředí lidí je vlnění dále ovlivněno příslušným akustickým prostředím, jeho tvarem a jeho vlastnostmi. V akustickém prostředí většinou najdeme současně zdroj hluku, různé předměty (např. stěny místností) a samozřejmě člověka. V takovém prostoru zvukové vlny narážejí na povrchy předmětů, stěn i podlahy, přičemž část akustické energie se vždy odrazí, část pohltí a část projde dovnitř těchto předmětů. [3]

#### 3.2 Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na překážku

Jak bylo uvedeno v úvodní kapitole, při dopadu zvukové vlny na překážku (např. povrch stěny) se část této vlny odrazí, část pohltí a část projde do prostoru za překážkou. Intenzita  $I_0$  zvuku, tj. akustický výkon, jenž dopadá na  $1 \text{ m}^2$  plochy, se rozdělí na následující složky [5]

- $I_1$  – intenzita zvuku odražené vlny
- $I_2$  – intenzita zvuku pohlcené vlny
- $I_3$  – celková intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu
- $I_4$  – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry
- $I_5$  – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
- $I_6$  – intenzita zvuku vlny, jež je vedena formou chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí
- $I_7$  – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo



Obrázek 8 – Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na povrch (převzato z [7])

### 3.3 Činitele zvuku

Na základě energetické bilance při dopadu zvukové vlny jsme schopni definovat jednotlivé činitele zvuku.

#### 3.3.1 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost tělesa pohlcovat zvuk je charakterizována činitelem zvukové pohltivosti  $\alpha$ , který je dán poměrem energie pohlcené  $I_2$  určitou plochou ku energii dopadající  $I_0$ , z čehož vyplývá, že  $\alpha$  je bezrozměrná veličina.

$$\alpha = \frac{\text{energie pohlcená}}{\text{energie dopadající}} = \frac{I_2}{I_0} = 1 - |\beta|^2 \quad (45)$$

Kde:  $\beta$  [-] – činitel zvukové odrazivosti

Protože platí zákon zachování energie, pak se musí pohybovat součinitel zvukové pohltivosti v intervalu od 0 do 1. Stěna, která akustickou energii zcela pohltí, bude mít  $\alpha = 1$ , naopak stěna, jenž energii zvuku plně odrazí, bude charakterizována  $\alpha = 0$ . Velikost činitele zvukové pohltivosti závisí na mnoha faktorech, zejména na frekvenci dopadajícího vlnění, tloušťce materiálu, teplotě, rozložení, pórovitosti materiálu, apod.

### 3.3.2 Činitel zvukové odrazivosti

Činitel odrazivosti zvuku  $\beta$  je definován, jako poměr intenzity zvuku vlny odražené od stěny k intenzitě zvuku vlny dopadající na tuto stěnu.

$$\beta = \frac{\text{energie odražená}}{\text{energie dopadající}} = \frac{I_1}{I_0} \quad (46)$$

Stejně, jako tomu bylo u činitele pohltivosti, leží i  $\beta$  v intervalu od 0 do 1. Stěna dokonale odražející akustickou energii bude mít  $\beta = 1$ , oproti tomu stěna, která veškerou dopadající akustickou energii pohltí, bude mít  $\beta = 0$ . Z energetického hlediska tedy musí platit, že součet činitelů zvukové pohltivosti a odrazivosti bude roven 1.

$$\alpha + \beta = 1 \quad (47)$$

### 3.3.3 Činitele zvukové průzvučnosti a tepelné přeměny

Již jsme se definovali činitele odrazu a pohlcování, nicméně z obrázku je patrné, že část pohlcené akustické energie prostoupí dále za překážku (plocha stěny), část se přemění v tepelnou energii a část se přenáší na zbylé komponenty konstrukce ve formě chvění. Z tohoto důvodu je tedy zaveden činitel zvukové průzvučnosti  $\tau$  a činitel tepelné přeměny  $\varepsilon$ , pro které platí následující vztahy

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0} \quad (48)$$

$$\varepsilon = \frac{I_7}{I_0} \quad (49)$$

Na obrázku je též znázorněna výše zmíněná energie šířící se formou chvění  $I_6$  do přilehlých konstrukcí, která je však v případě zvukoizolačních plechových krytů zanedbatelnou hodnotou. Vzhledem k zákonu zachování energie tedy platí

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1 \quad (50)$$

Porovnáme-li rovnice (46) a (49), lze psát

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (51)$$

### 3.3.4 Činitel zvukové redukce:

Používá se ke stanovení míry zvukové izolace poskytované konstrukcemi (stěna, dveře, okno, ventilátor atp.). Je to pouze laboratorní veličina, jež využívá znalostí relativních rozměrů řady místností určených k testování, doby dozvuku v „přijímací“ místnosti a známé hladiny hluku, která může přestoupit mezi řadou místností jinou cestou (obložení) plus velikost testovaného vzorku ke stanovení velmi přesné a opakovatelné veličiny vyjadřující chování zkušebního materiálu nebo konstrukce. [5]

## 3.4 Metody měření činitele zvukové pohltivosti

### 3.4.1 Metoda poměru stojaté vlny (ČSN ISO 10534-1)

Pomocí této metody určujeme činitele zvukové pohltivosti, činitele odrazu a povrchové impedance nebo admitance materiálů. Hodnoty určujeme pro kolmý dopad zvuku vyhodnocením pole rovinné stojaté vlny v impedanční trubici. [8]

Principem spočívá v upevnění vzorku do jednoho, těsně uzavíratelného konce rovné, tuhé a hladké impedanční trubice. V opačném konci trubice je umístěn reproduktor, který budí sinusovou zvukovou vlnu, jež na vzorek dopadá. V trubici vzniká stojatá vlna superpozicí dopadající vlny  $p_i$  a vlny odražené od zkušebního vzorku  $p_r$ .  $p = p_i + p_r$

Hodnotíme amplitudy akustického tlaku v tlakových minimech a maximech (v jednom či více). Z těchto údajů již můžeme dle normy ČSN ISO 10534-1 určit činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ . [6]

Tlakové maximum vzniká tam, kde jsou  $p_i$  a  $p_r$  ve fázi

$$|p_{max}| = |p_0| \cdot (1 + |r|) \quad [Pa] \quad (52)$$

Tlakové maximum vzniká tam, kde jsou  $p_i$  a  $p_r$  ve fázi

$$|p_{min}| = |p_0| \cdot (1 - |r|) \quad [Pa] \quad (53)$$

Protože v impedanční trubici měříme akustický tlak v logaritmickém měřítku (v decibelech) a rozdíl hladin mezi tlakovým maximum a tlakovým minimum je  $\Delta L$  [dB], pak platí

$$s = 10^{\Delta L/20} \quad (54)$$

Konečný vztah pro určení činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  je

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{4L/20}}{\frac{4L}{(10^{20}+1)^2}} \quad [-] \quad (55)$$

Tato metoda je vhodná pro vyšetřování parametrů a navrhování akustických obkladů, neboť vyžaduje malé vzorky zkoumaného pohltivého materiálu. [8]

### 3.4.2 Metoda dozvukové komory (ČSN EN ISO 354)

Pokud v uzavřeném prostoru působí zdroj zvuku, pak je hladina akustického tlaku a jeho následné doznívání po vypnutí zdroje dáno absorpčními vlastnostmi povrchů stěn, média vyplňujícího prostor a předmětů v tomto prostoru. Obvykle je akustická energie, kterou plocha pohltí, závislá na úhlu dopadu. Sledujeme-li snížení hluku v místnosti, je nutné znát pohltivé vlastnosti povrchů, obvykle reprezentovaným vhodně zvoleným průměrem všech úhlů dopadu. [9]

Podstatou této metody je určení činitele zvukové pohltivosti poměrem ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku k ploše zkušební vzorku. Ekvivalentní pohltivá plocha  $A_T$  se vypočítá pomocí Sabineovy rovnice dle normy ČSN EN ISO 354 na základě dvou průměrných dob dozvuku. Tyto doby dozvuku se měří v dozvukové místnosti s namontovaným zkušebním vzorkem a bez něj. Pokud zkušební vzorek rovnoměrně pokrývá povrch (rovinné pohltivé obklady), pak činitele zvukové pohltivosti získáme podílem ekvivalentní pohltivé plochy  $A_T$  ku vyšetřované ploše  $S$ . [6]

Dobu dozvuku místnosti v určitém frekvenčním pásmu vyjádříme aritmetickým průměrem celkového počtu měření doby dozvuku příslušného frekvenčního pásma. Průměrné doby dozvuku místnosti  $T_1$  a  $T_2$  vypočítáme a vyjádříme s přesností minimálně na dvě desetinná místa.

Ekvivalentní plochu prázdné dozvukové místnosti vypočítáme pomocí vztahu

$$A_1 = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_1} - 4Vm_1 \quad [m^2] \quad (56)$$

Analogicky pro plochu dozvukové místnosti se vzorkem

$$A_2 = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_2} - 4Vm_2 \quad [m^2] \quad (57)$$

Kde:  $V$  [ $m^3$ ] – objem prázdné dozvukové komory

$c$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] – rychlost šíření zvuku ve vzduchu

$T_1$  [s] – doba dozvuku prázdné dozvukové komory

$T_2$  [s] – doba dozvuku dozvukové komory obsahující vzorek

$m_1$  [ $m^{-1}$ ] – součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovaly v prázdné dozvukové komoře

$m_2$  [ $m^{-1}$ ] – součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovaly v dozvukové komoře při vložení vzorku

Ekvivalentní plochu  $A_T$  tedy určíme ze vztahu

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad [m^2] \quad (58)$$

Konečný vztah pro výpočet koeficientu zvukové pohltivosti bude následovný

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} \quad (59)$$

### 3.4.3 Metoda přenosové funkce (ČSN ISO 10534-2)

Tuto metodu měření koeficientu zvukové pohltivosti využijeme v praktické části této práce, a proto ji rozvedeme o něco podrobněji.

Metoda přenosové funkce zahrnuje použití impedanční trubice, dvou míst mikrofónů a digitálního systému k vyhodnocování frekvenční závislosti k určení činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  akustických obkladů při kolmém dopadu zvuku. Tento způsob je podobný zkušební metodě poměru stojaté vlny uvedené dle ČSN ISO 10534-1 v tom, že používá impedanční trubici se zdrojem zvuku připevněným na jednom konci a na druhém konci se zkušebním vzorkem. Postup měření je však jiný. V této metodě se měří akustický tlak dvěma mikrofóny, tím docílíme rozkladu interferenčního pole. Tato zkušební metoda je považována za alternativní a je časově méně náročná než metoda poměru stojaté vlny. V porovnání s metodou v dozvukové místnosti dle ISO 354 nepotřebujeme tak velké zkušební vzorky.

Princip spočívá v upevnění vzorku do hladké, tuhé a utěsněné impedanční trubice. Zdroj hluku (náhodný signál, pseudonáhodný sled nebo přeladovaný tón) produkuje rovinné akustické vlny a dvěma mikrofóny měříme akustický tlak poblíž místa umístění vzorku. Určí se komplexní akustická přenosová funkce dvěma mikrofonních signálů a ty se použijí

k získání hodnoty činitele zvukové pohltivosti při kolmém dopadu. Tuto metodu lze použít také k určení akustické povrchové impedance nebo admitance pohltivých materiálů. Protože se akustická impedance materiálu vztahuje k jeho fyzikálním vlastnostem (poréznost, pružnost, hustota,...), jsou příslušná měření užitečná pro výzkum a vývoj výrobků. [10]

Vztah pro určení činitele zvukové pohltivosti je dán rovnicí

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (60)$$

Kde:  $r$  [-] – činitel odrazu akustického tlaku

$r_r$  [-] – reálná složka činitele odrazu akustického tlaku

$r_i$  [-] – imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku

Přičemž je tento činitel dán vztahem

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R + H_{12}} \cdot e^{2k_0 \cdot x_1 i} \quad (61)$$

Kde:  $H_{12}$  – přenosová funkce mezi místy 1 a 2

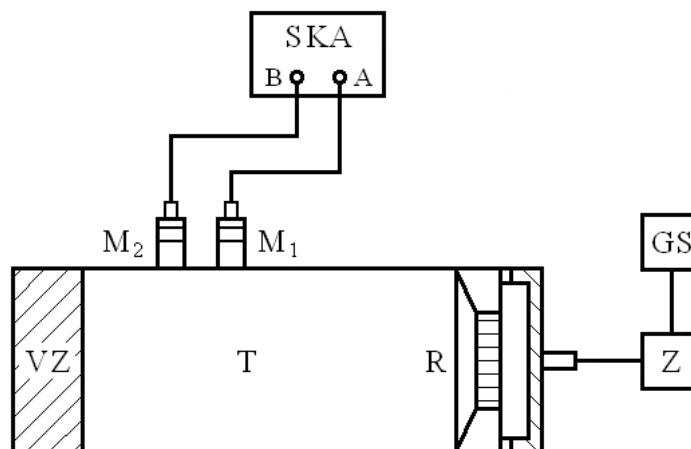
$H_I$  – přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu

$H_R$  – přenosová funkce pro samotnou odrážející vlnu

$k_0$  – komplexní vlnové číslo

$x_0$  – vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonom od něj

$i$  – imaginární jednotka



Obrázek 9 - Princip měření činitele zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce. (převzato z [6])



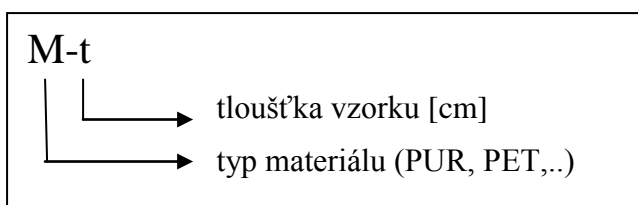
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 ZKOUMANÉ MATERIÁLY

Materiály vzorků pro praktickou část této bakalářské práce jsme volili z oblasti polymerů či elastomerů, a to hlavně vzhledem k technickému zaměření Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně – Fakulty technologické. Vzorky se vyráběly speciálně pro experimentální účely měření zvukové pohltivosti v impedanční trubici o průměru 10 cm. V následující tabulce je uveden přehled všech zkoumaných materiálů včetně jejich označení tak, jak budou uvedeny v grafech a dalších tabulkách

Přehled zkoumaných materiálů				
Materiál	tloušťka [cm]	Označení	hmotnost [g]	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]
PUR pěna (jemné póry)	1	PUR1-1	1,989	2,53.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (jemné póry)	3	PUR1-3	5,471	2,32.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (jemné póry)	5	PUR1-5	8,877	2,26.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (polohrubé póry)	3	PUR2-3	6,472	2,75.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (polohrubé póry)	5	PUR2-5	10,855	2,77.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (hrubé póry)	5	PUR3-5	11,803	3,01.10 <sup>-2</sup>
PUR pěna (velmi hrubé póry)	5	PUR4-5	11,28	2,87.10 <sup>-2</sup>
Recyklát PUR pěny	2	REC-2	12,798	8,15.10 <sup>-2</sup>
Recyklát PUR pěny	3	REC-3	20,535	8,72.10 <sup>-2</sup>
Recyklát PUR pěny	5	REC-5	29,015	7,39.10 <sup>-2</sup>
Černá pryž (jemná struktura)	2	PR1-2	109,099	6,95.10 <sup>-1</sup>
Černá pryž (hrubá struktura)	3	PR2-3	145,795	6,19.10 <sup>-1</sup>
Zelená pryž	1	PR3-1	67,09	8,55.10 <sup>-1</sup>
Hnědá pryž	2	PR4-2	140,773	8,97.10 <sup>-1</sup>
Bílá pryž	2	PR5-2	103,897	6,62.10 <sup>-1</sup>
PUR pěna (Tvarovaná)	5	PUR5-5	5,066	1,29.10 <sup>-2</sup>
PET	2	PET-2	224,718	1,43
PMMA	2	PMMA-2	179,586	1,14
PP	2	PP-2	141,701	9,03.10 <sup>-1</sup>
PUR pěna (jednostranně vlnitá)	5	PUR6-5	10,999	2,80.10 <sup>-2</sup>
Skelná vata	5	SV-5	3,672	9,36.10 <sup>-3</sup>
PS	3	PS-3	2,64	1,12.10 <sup>-2</sup>
Textil \ korek	1	TEKO-1	52,427	6,68.10 <sup>-1</sup>
Korek \ textil	1	KOTE-1	52,427	6,68.10 <sup>-1</sup>

Tabulka 5 – Přehled zkoumaných vzorků



Poslední vzorek (korek \ textil) je do tabulky zahrnut dvakrát, a to z toho důvodu, že jde kombinovaný materiál, kde má z hlediska pohlcování samozřejmě vliv posloupnost materiálů zvuku vystavených. Co se týče hustoty tohoto složeného materiálu, nebylo možné experimentálně určit hodnotu dílčích hustot. Vzhledem k tomu, že textilní povrch je převážně ve formě vláken náhodně čnicích do prostoru cca 0 - 1 mm od povrchu korku, počítal jsem hustotu jako by byl vzorek čistý korek o šířce 10 mm.

## 4.1 Pěnové polymery

### 4.1.1 Polyuretanová (PUR) pěna

#### 4.1.1.1 PUR pěna (jemné póry)

- PUR1-1
- PUR1-3
- PUR1-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 2,37 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 10 – PUR pěna (jemné póry)

#### 4.1.1.2 PUR pěna (polohrubé póry)

- PUR2-3
- PUR2-5

Experimentálně určená hustoty:

$$\rho = 2,76 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 11 – PUR pěna (polohrubé póry)

#### 4.1.1.3 PUR pěna (hrubé póry)

- PUR3-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 3,01 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 12 – PUR pěna (hrubé póry)

#### 4.1.1.4 PUR pěna (velmi hrubé póry)

- PUR4-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 13 – PUR pěna (velmi hrubé póry)

#### 4.1.1.5 Recyklát PUR pěny

- REC-2
- REC-3
- REC-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 8,09 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 14 – Recyklát PUR pěny

#### 4.1.1.6 PUR pěna (Tvarovaná)

- PUR5-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 2,80 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 15 – PUR pěna (Tvarovaná)

#### 4.1.1.7 PUR pěna (jednostranně vlnitá)

- PUR6-5

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 2,80 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 16 – PUR pěna (jednostranně vlnitá)

#### 4.1.2 Pěnový polystyrén (PS)

- PS-3

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 1,12 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 17 – Pěnový polystyrén (PS)

## 4.2 Homogenní tuhé polymery

### 4.2.1 Polyethyltereftalát (PET)

- PET-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 1,43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



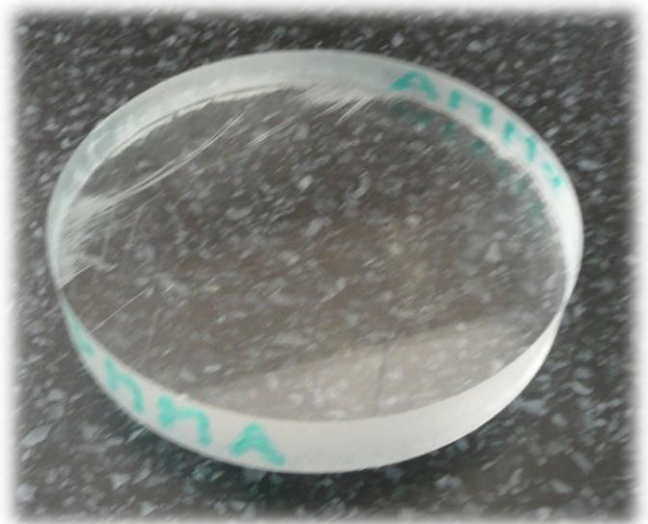
Obrázek 18 – Polyethyltereftalát (PET)

### 4.2.2 Polymethylmetakrylát (PMMA)

- PMMA-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 1,14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 19 – Polymethylmetakrylát (PMMA)

### 4.2.3 Polypropylen (PP)

- PP-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 9,03 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 20 – Polypropylen (PP)

## 4.3 Elastomery

### 4.3.1 Černá pryž (jemná struktura)

- PR1-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 6,95 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 21 – Černá pryž (jemná struktura)

### 4.3.2 Černá pryž (hrubá struktura)

- PR2-3

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 6,19 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



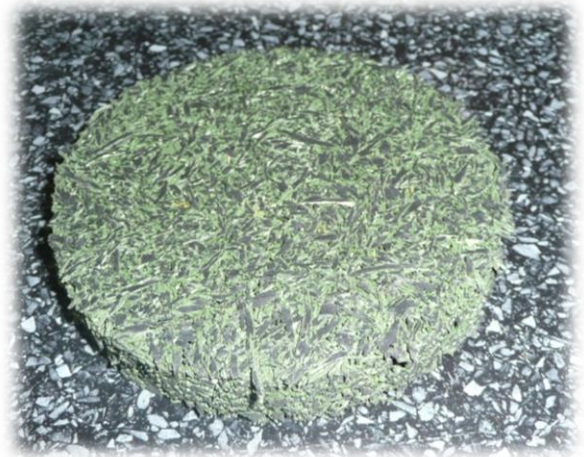
Obrázek 22 – Černá pryž (hrubá struktura)

### 4.3.3 Zelená pryž

- PR3-1

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 8,55 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 23 – Zelená pryž

### 4.3.4 Hnědá pryž

- PR4-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 8,97 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 24 – Hnědá pryž

### 4.3.5 Bílá pryž

- PR5-2

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 6,62 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 25 – Bílá pryž



#### 4.3.6 Korek s textilním povrchem

- KOTE-1
- TEKO-1

Experimentálně určená hustota:

$$\rho = 6,68 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 26 – Korek s textilním povrchem

#### 4.4 Ostatní druhy materiálů

##### 4.4.1 Skelná vata

- SV-5

Experimentálně určená hustota:

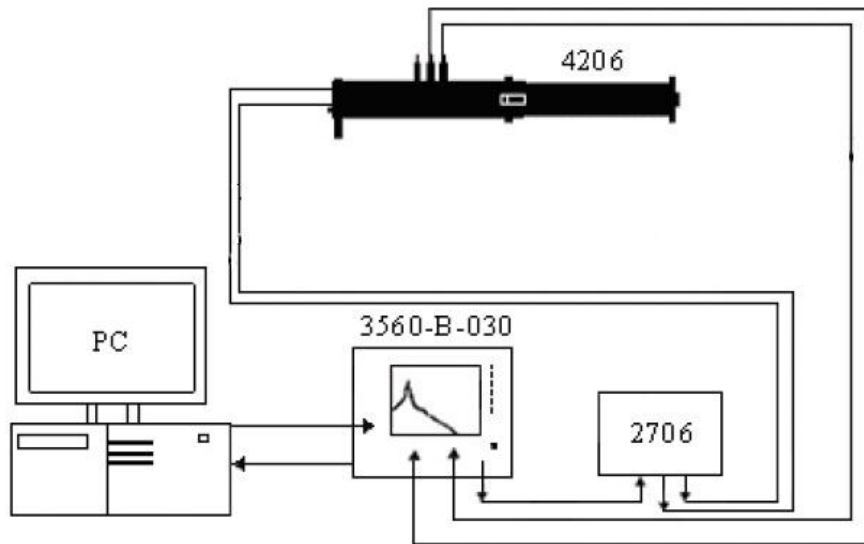
$$\rho = 9,36 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



Obrázek 27 – Skelná vata

## 5 POPIS MĚŘENÍ

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, měření součinitele probíhalo metodou přenosové funkce dle normy ČSN ISO 10534-2. Aparaturu jsme zapojili dle schématu a následně provedli kalibraci mikrofonů.



Obrázek 28 – Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti metodou přenosové funkce (převzato z [6])

Do trubice jsme postupně vkládali jednotlivé vzorky materiálů, jejich kombinace ve dvou a třech vrstvách, pokaždé bez i se vzduchovou mezerou. Vliv vzduchové mezery se posuzoval i v posledním experimentu, kdy jsme ji umístili mezi dva vzorky. Samotné měření zvukové pohltivosti probíhá v poměrně krátkém časovém úseku, což však kompenzuje příprava experimentu, kdy se vzorky umísťují do trubice a nastavuje se zvuková mezera. Výsledkem měření jsou frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti ve frekvenčním rozsahu  $f = \langle 0; 1600 \rangle$  Hz

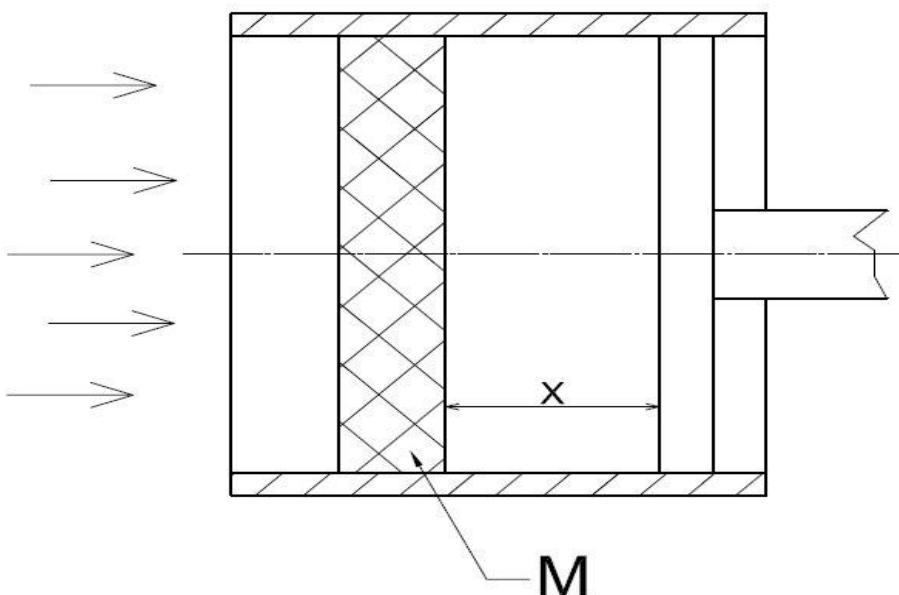
### 5.1 Použité přístroje a pomůcky

- Kundtova impedanční trubice
  - Brüel & Kjær typ 4206
  - Průměr 10 cm
- Zesilovač
  - Brüel & Kjær typ 2706

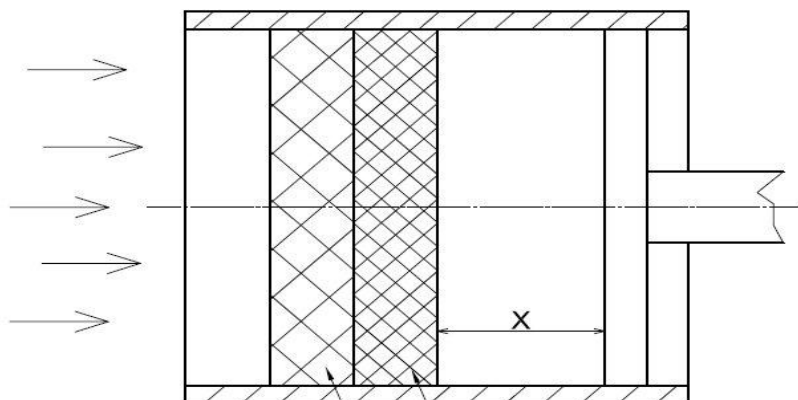
- Tříkanálový PULSE multianalyzátor
  - Brüel & Kjær typ 3560-B-030
- Kalibrační filtr o průměru 100 mm
- Notebook
- Posuvné měřidlo
- Vzorčky materiálů o průměru 100 mm



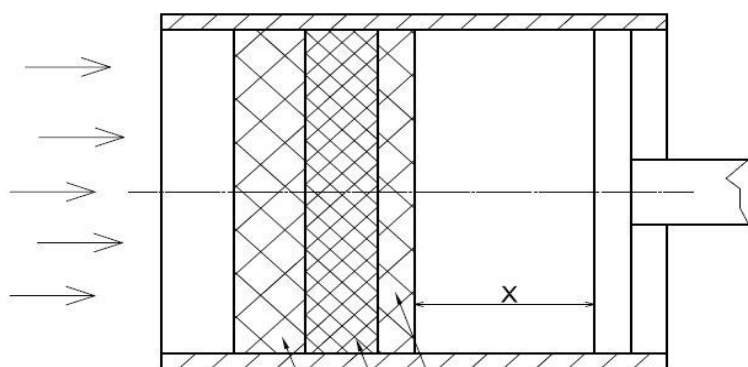
Obrázek 29 – Sestavená měřicí aparatura



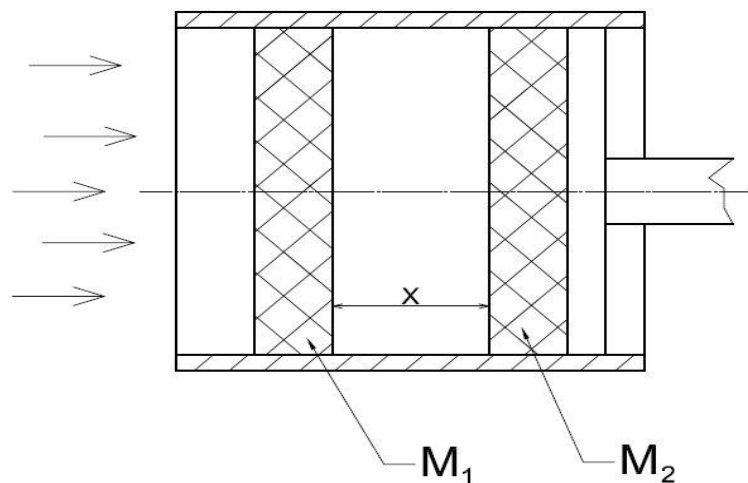
Obrázek 30 – měření jednotlivých materiálů



Obrázek 31 – měření kombinace dvou vrstev



Obrázek 32 – měření kombinace tří vrstev

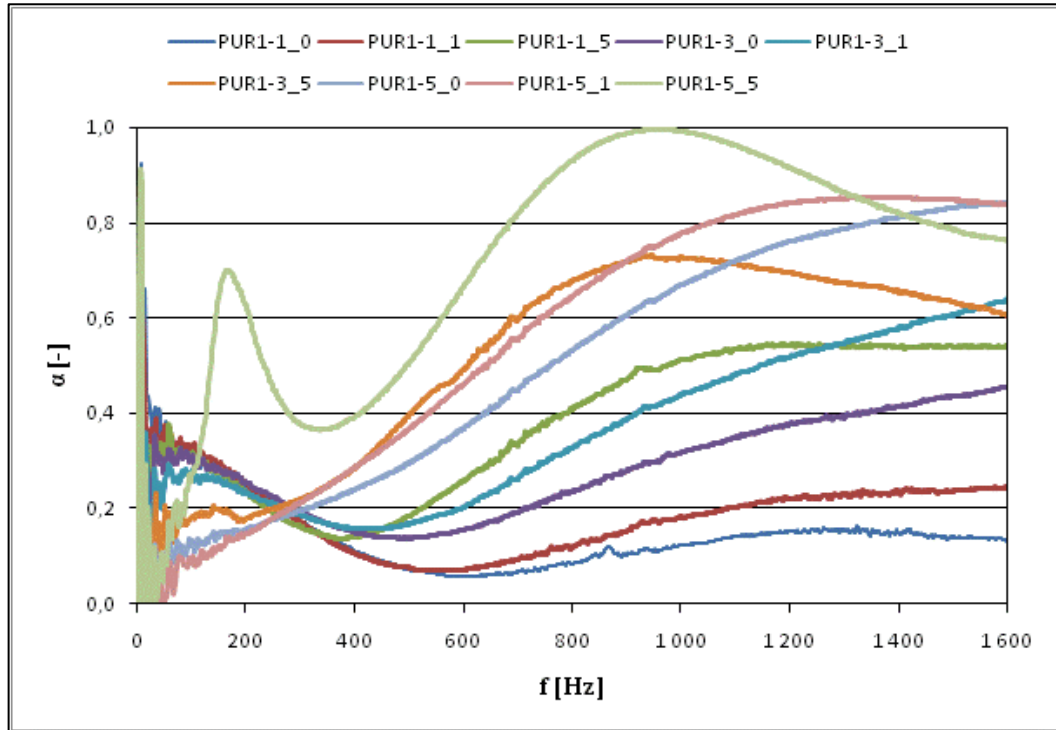


Obrázek 33 – měření se vzduchovou mezerou mezi dvěma vzorky

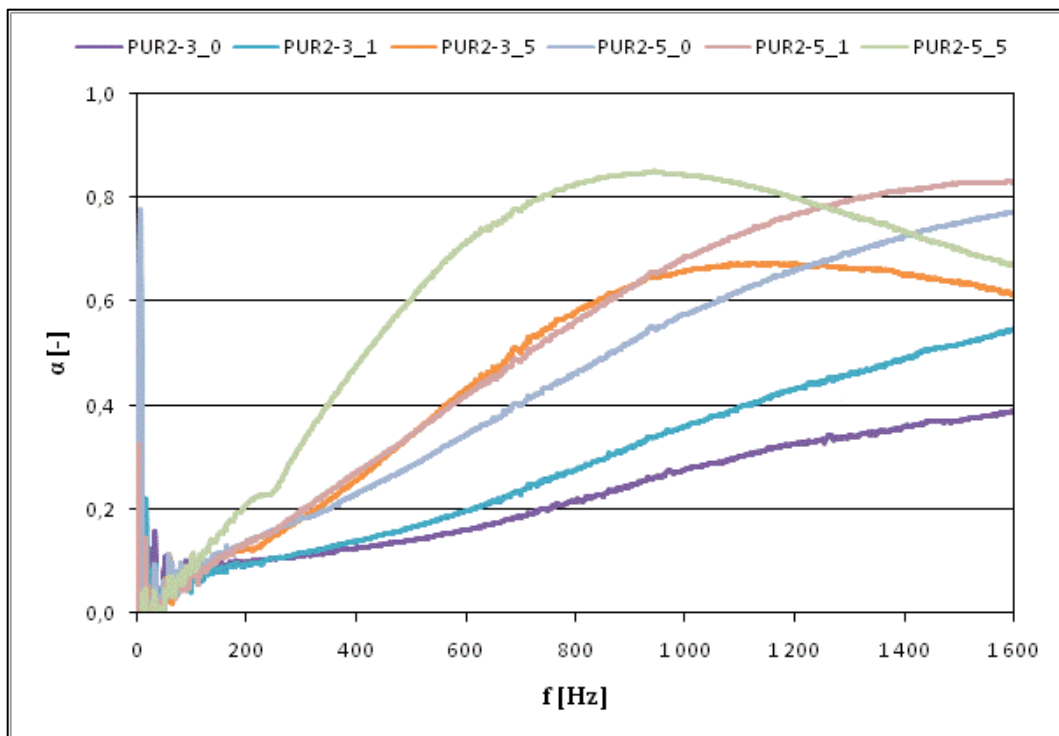


### 6.1.1 Frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti jednotlivých materiálů

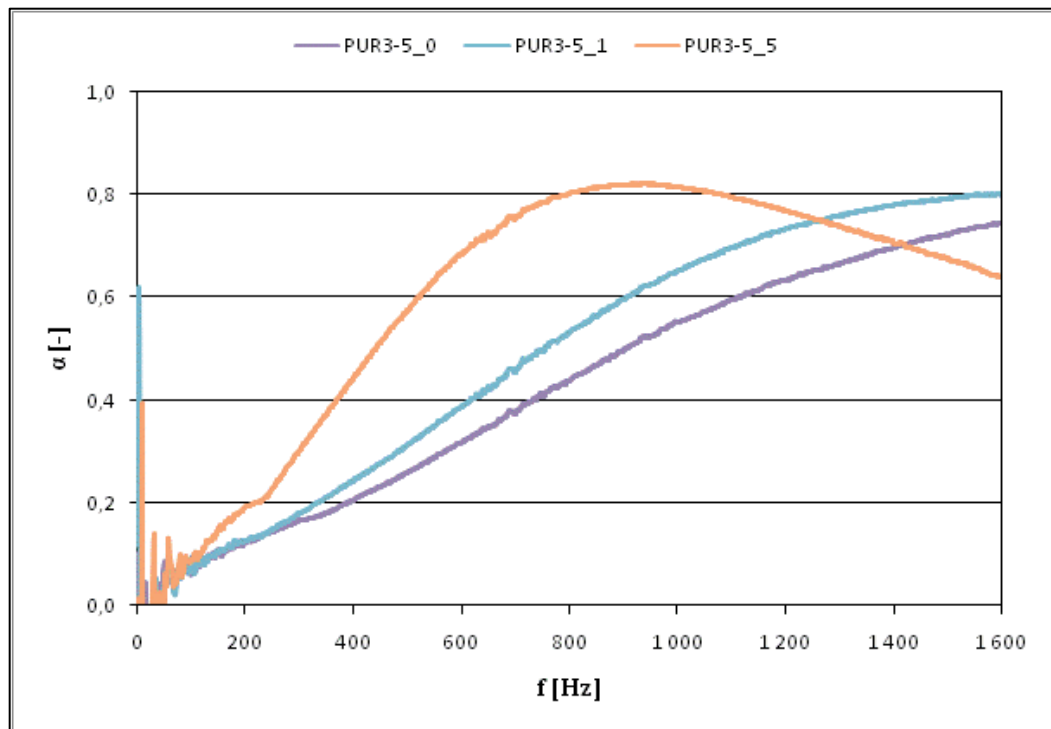
#### 6.1.1.1 Pěnové polymery



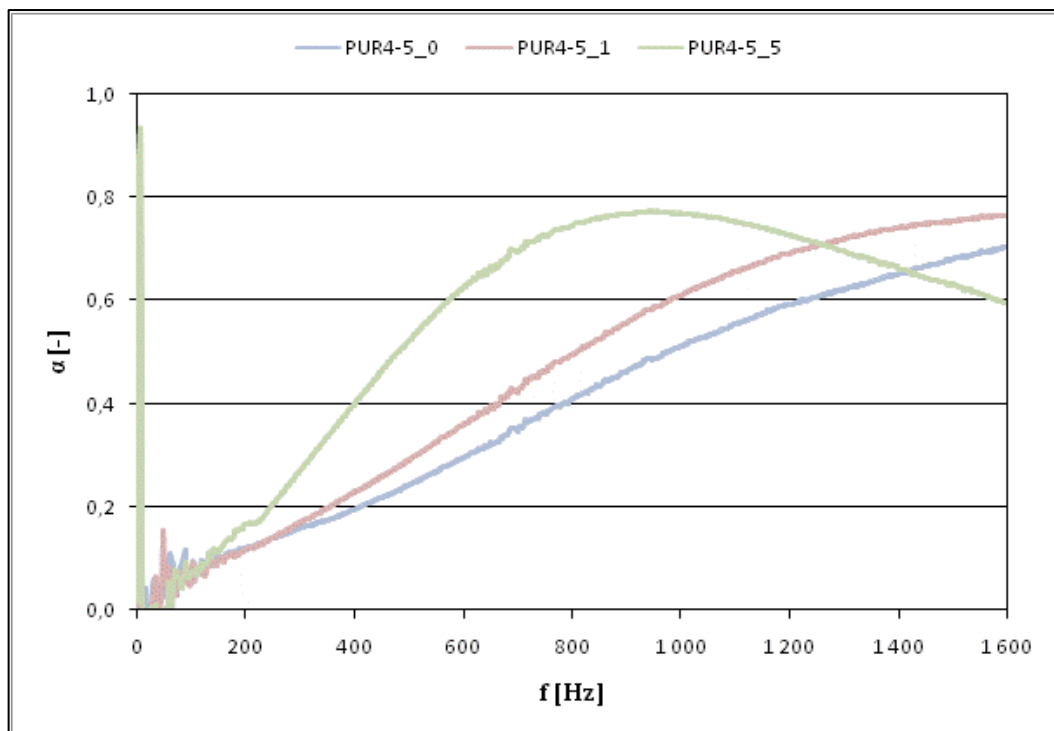
Graf 1 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. promateriál PUR1-t\_x



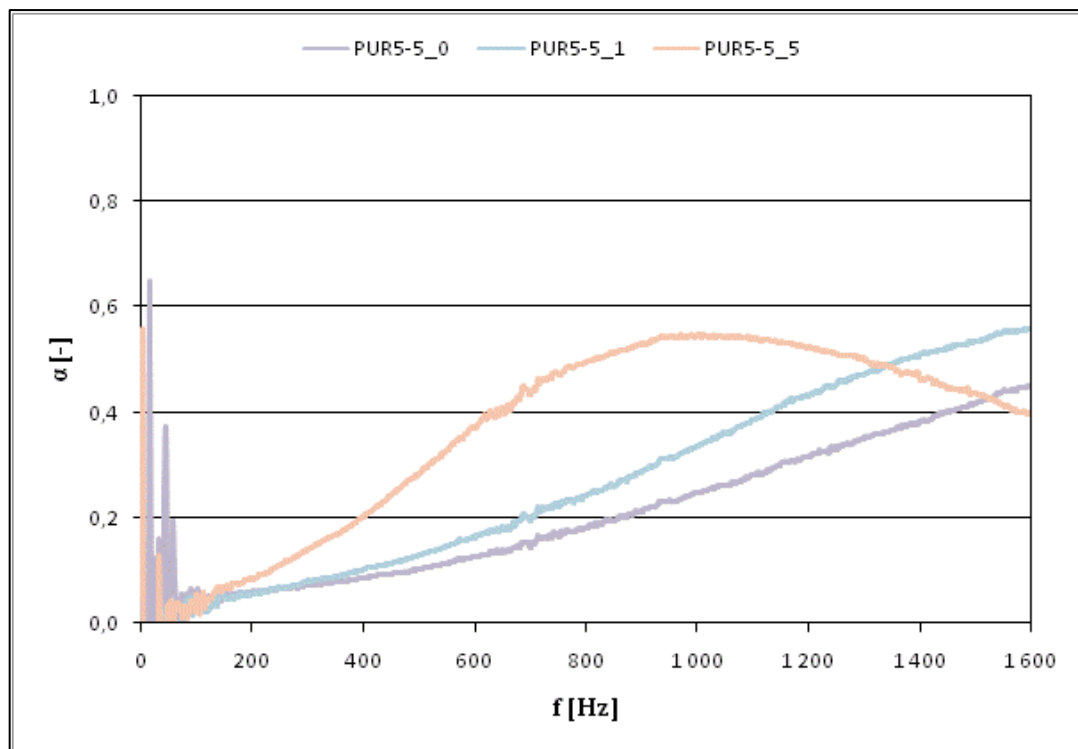
Graf 2 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR2-t\_x



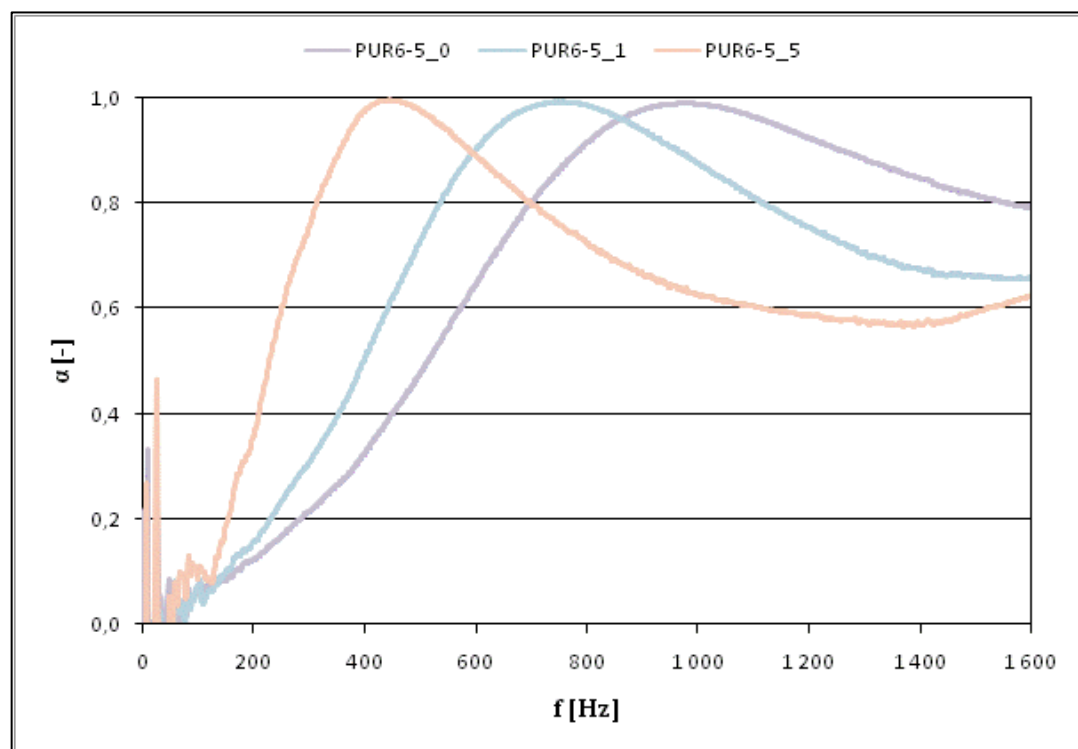
Graf 3 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR3-t\_x



Graf 4 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR4-t\_x

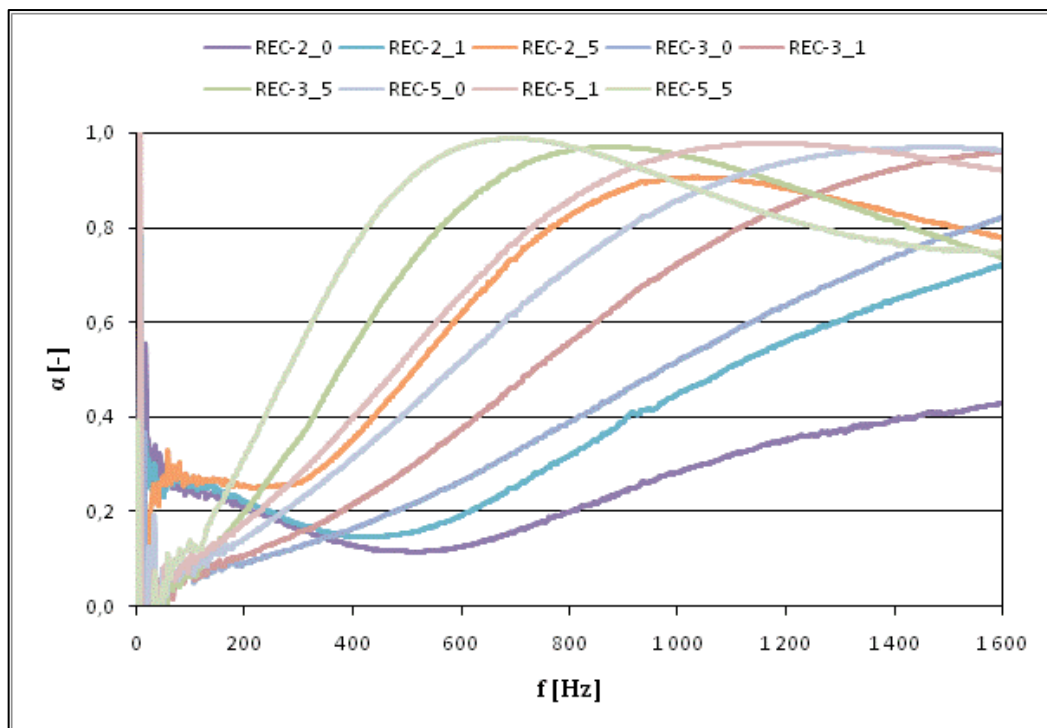


Graf 5 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR5-t\_x

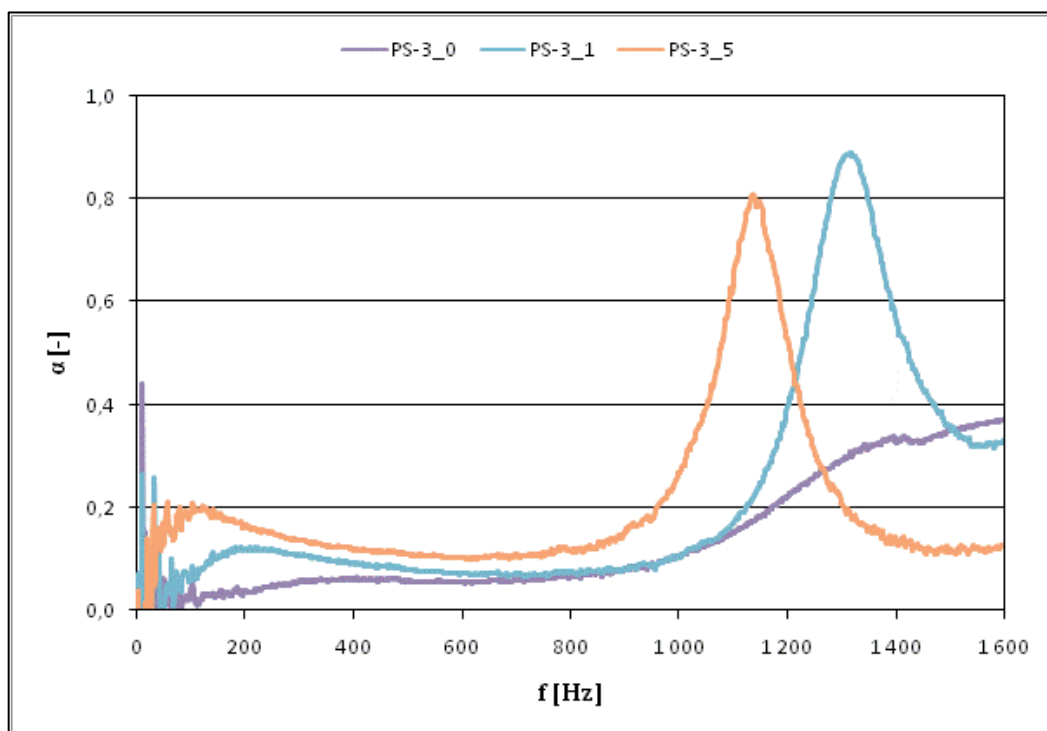


Graf 6 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR6-t\_x



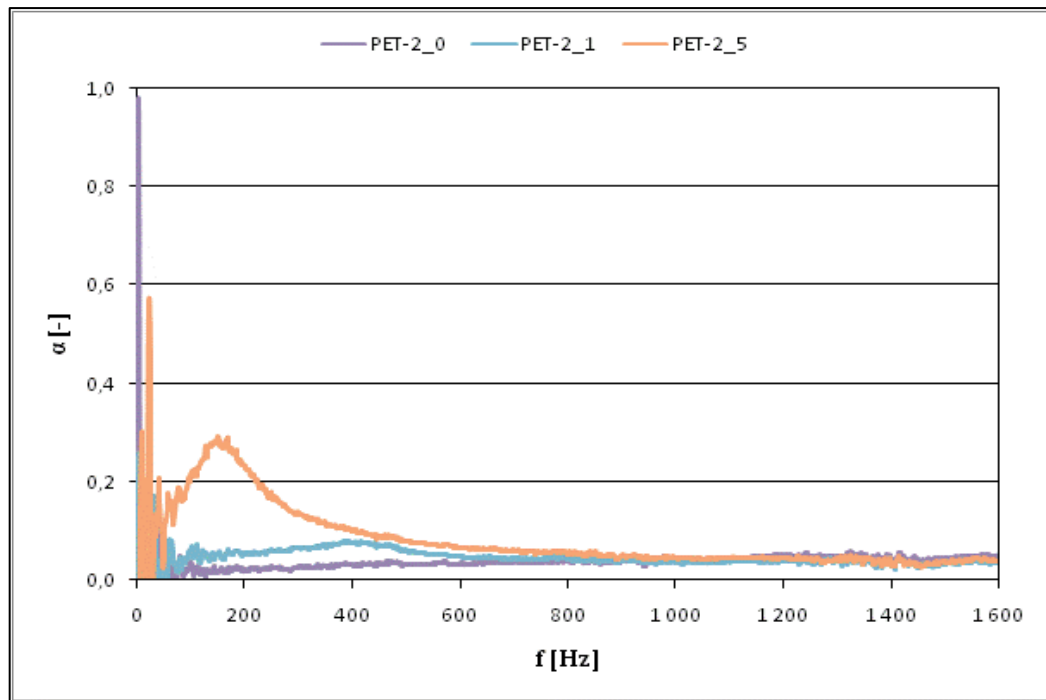


Graf 7 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál REC-t\_x

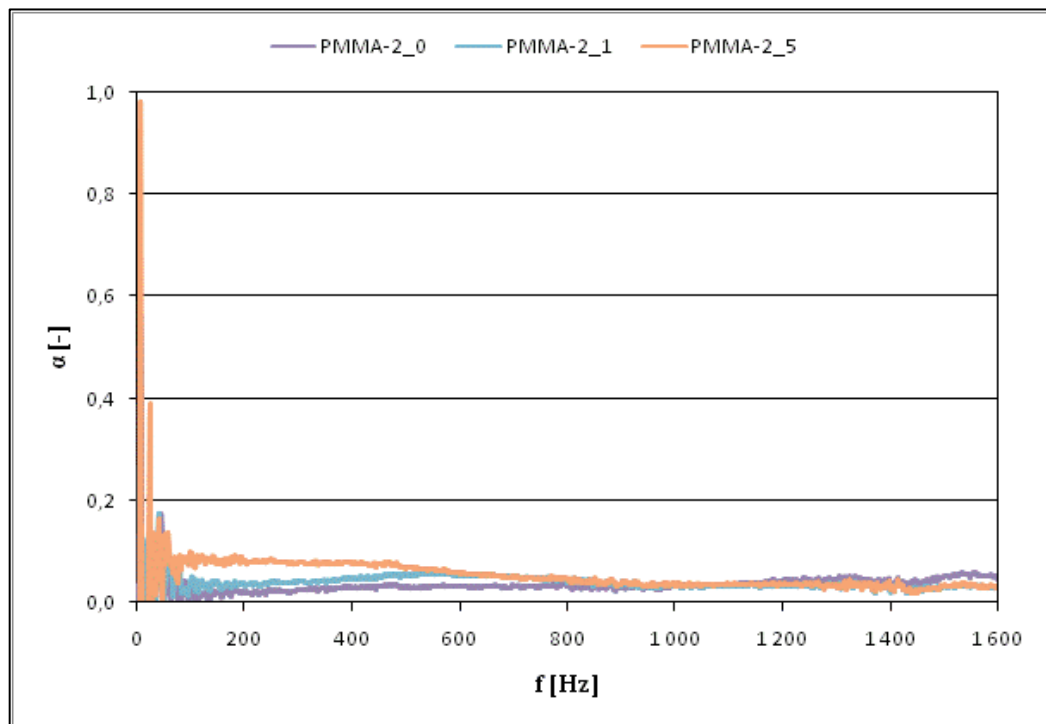


Graf 8 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PS-t\_x

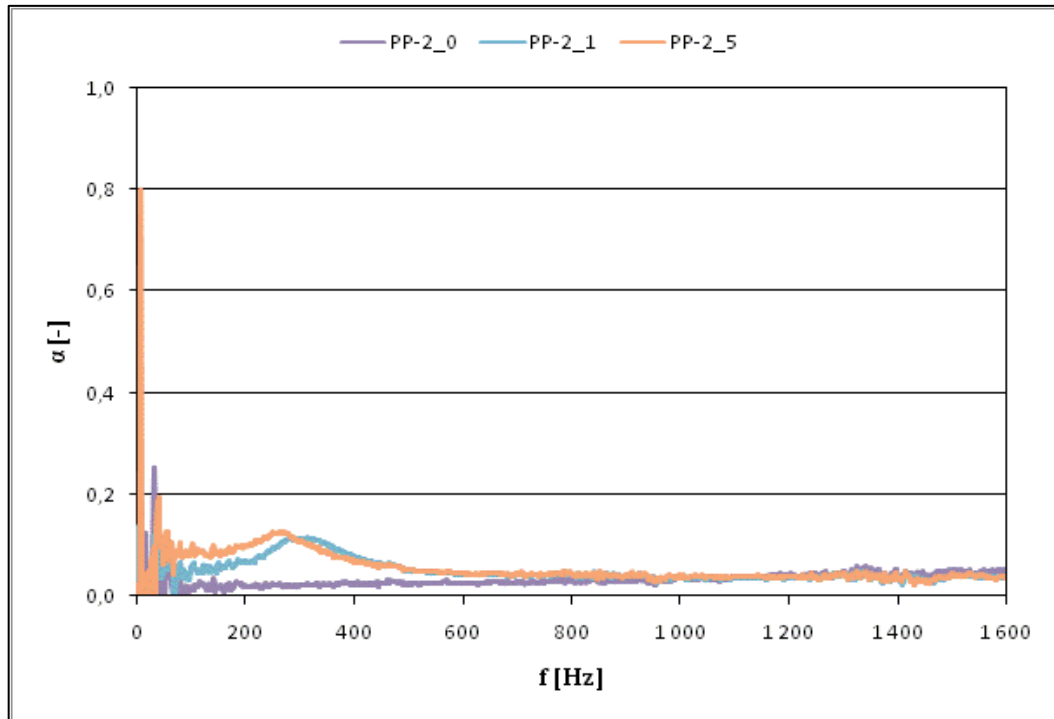
### 6.1.1.2 Tuhé homogenní polymery



Graf 9 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PET-t\_x

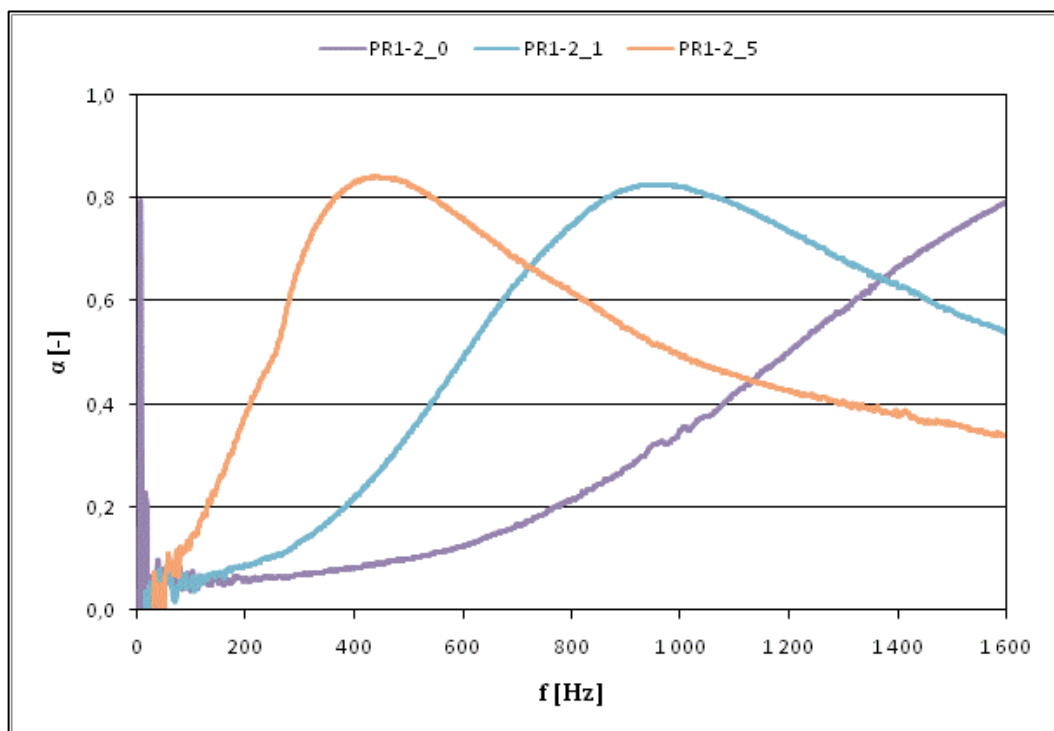


Graf 10 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PMMA-t\_x

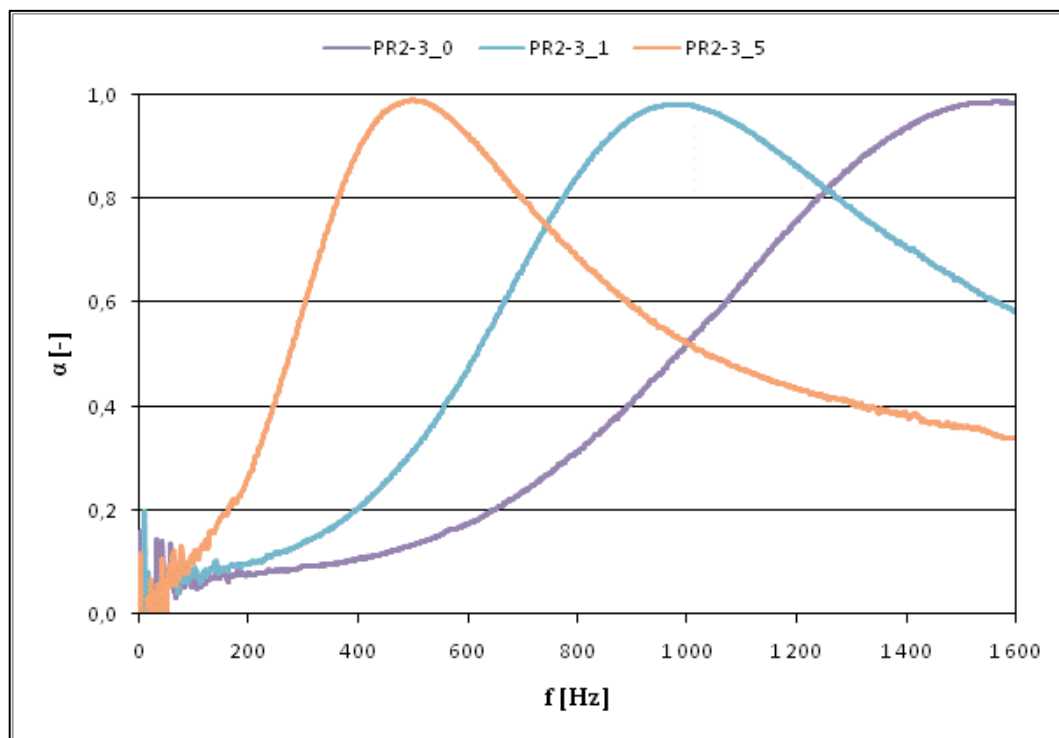


Graf 11 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PP-t\_x

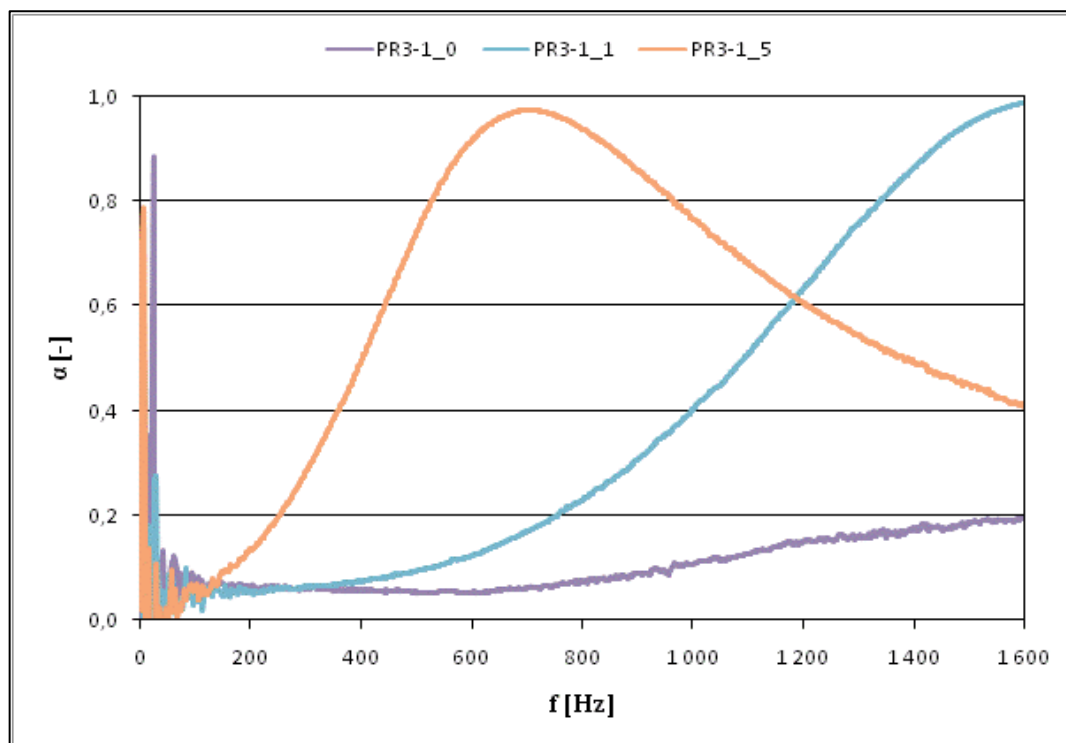
### 6.1.1.3 Elastomery



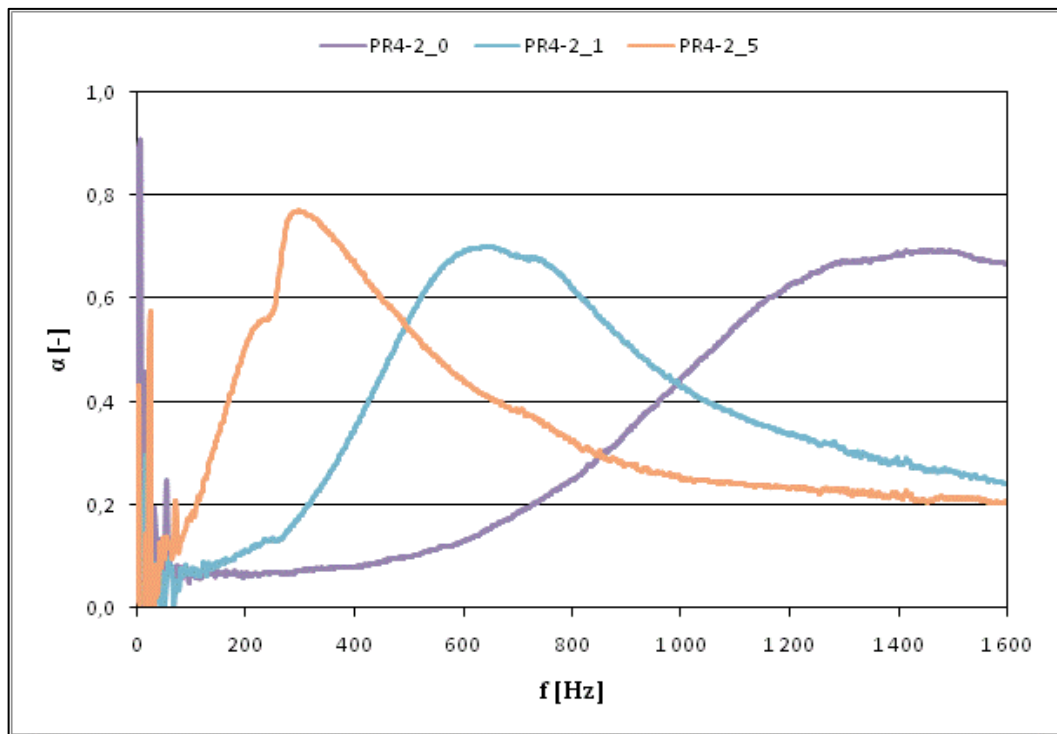
Graf 12 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR1-t\_x



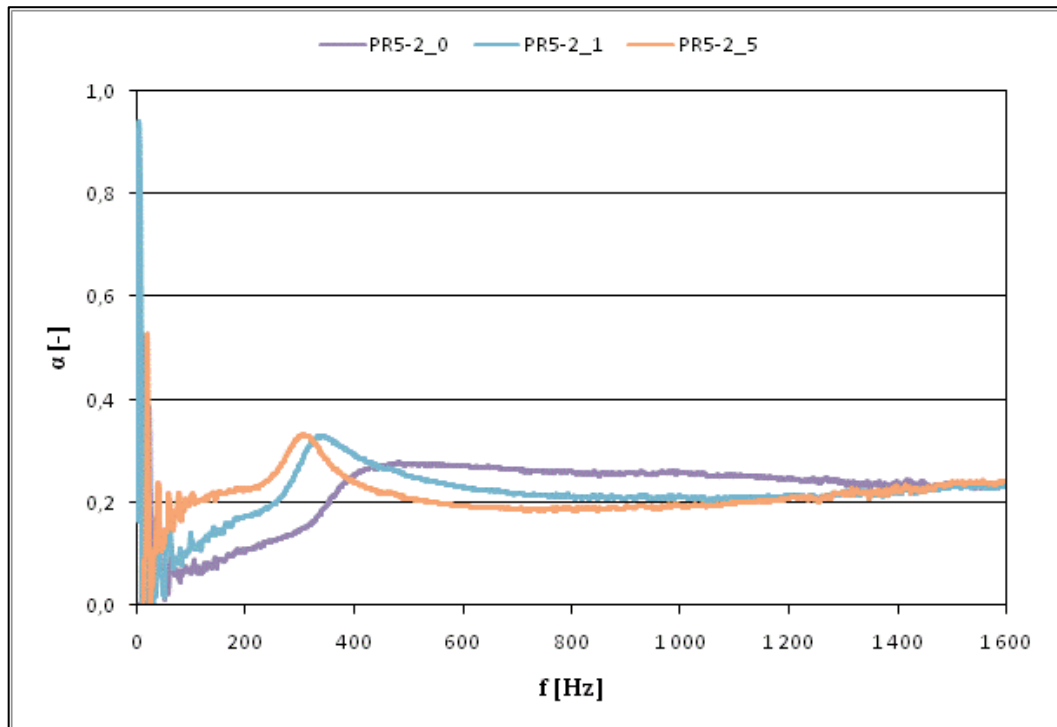
Graf 13 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR2-t\_x



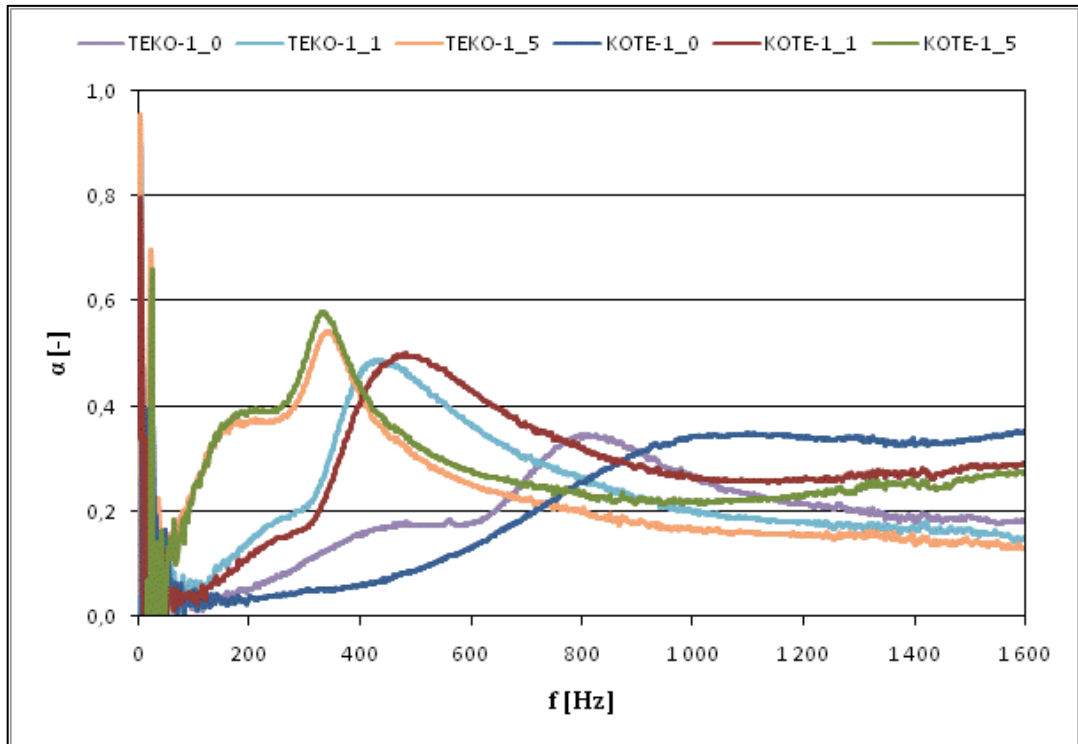
Graf 14 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR3-t\_x



Graf 15 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR4- $t_x$

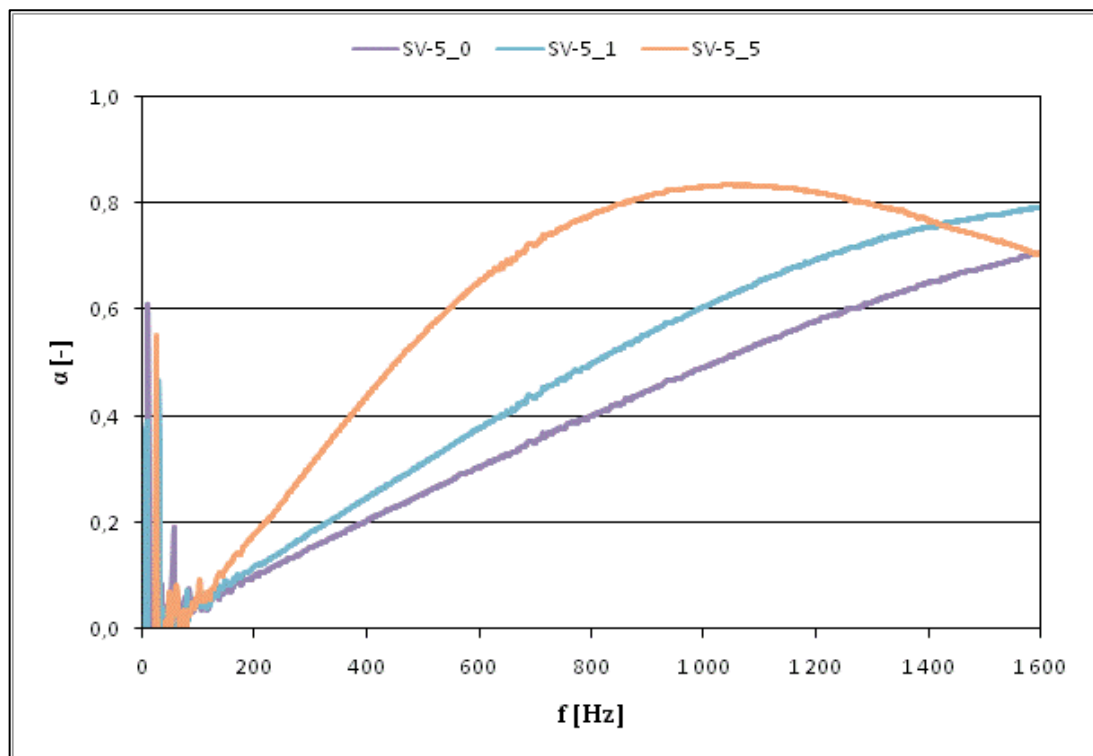


Graf 16 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR5- $t_x$



Graf 17 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál TEKO-t<sub>x</sub>; KOTE-t<sub>x</sub>

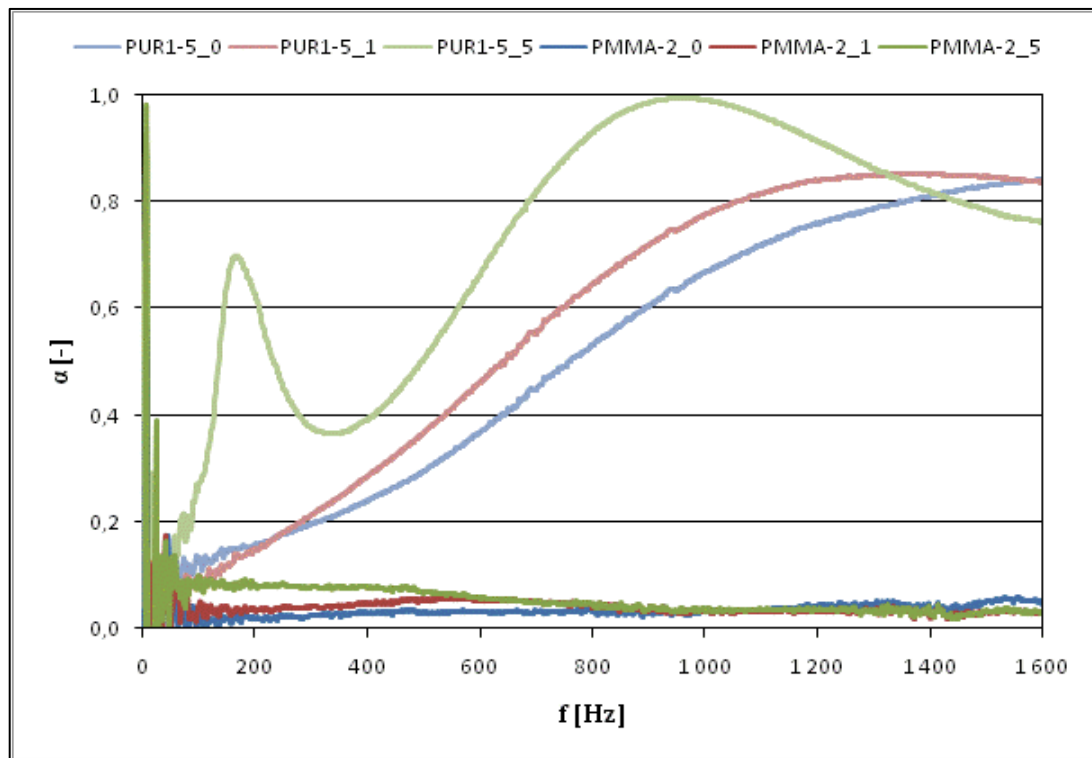
#### 6.1.1.4 Ostatní druhy materiálů



Graf 18 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál SV-t<sub>x</sub>

Tato kapitola byla úvodem do praxe absorbování zvuku a již z těchto uvedených charakteristik můžeme diskutovat o vlastnostech jednotlivých materiálů. Tak například, že pěnové materiály oproti homogenním tuhým, vykazují mnohem lepší zvukovou pohltivost. Pojděme nyní zkoumat příčiny pohlcování hlouběji

### 6.1.2 Vliv vzduchové mezery



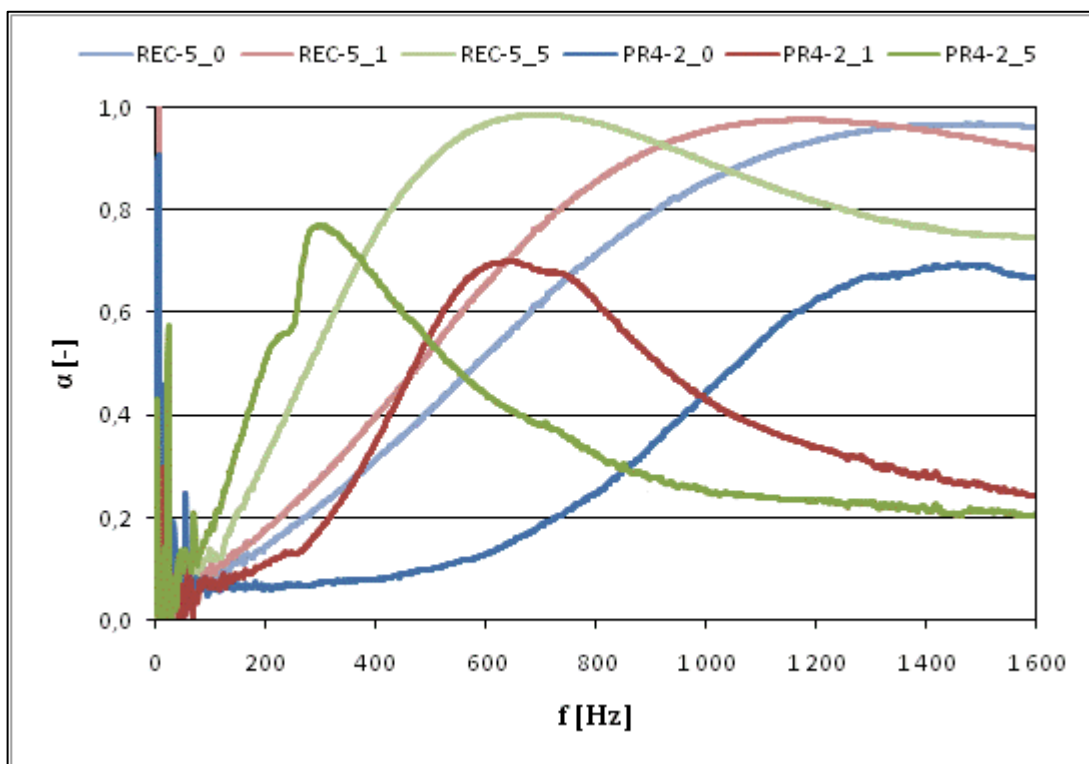
Graf 19 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM pro PUR1-5\_x ; PMMA-2\_x

Tímto experimentem jsme demonstrovali vliv vzduchové mezery. Vzduchová mezera je vhodná pro pohlcování zvuku o nízkých frekvencích, a to tak, že čím větší bude vzdálenost vzduchové mezery, tím menší frekvence bude zvuková izolace pohlcovat. Asi nejlepších pohlcovacích vlastností jsme dosáhli u pěnového polyuretanu (**PURI-5**) se vzduchovou mezerou 5 cm. Tento pěnový materiál vykazoval výborné pohlcovací vlastnosti již na začátku, ale s přidáním vzduchové mezery jsme získali navíc absorpci nižších frekvencí, aniž bychom nějak výrazně narušili původní pohltivost.

U pevného materiálu (*PMMA-2*) jsme se pouze utvrdili v naší teorii o pohlcování nízkých frekvencí, která je způsobena vzduchovou mezerou. Nepatrné zlepšení pohlcování zvuku tedy lze i u pevných materiálů.

U recyklátu (*REC-5*) došlo v důsledku vzduchové mezery k menšímu zhoršení absorpčních vlastností při vysokých frekvencích, při středních kmitočtech se samozřejmě zlepšily.

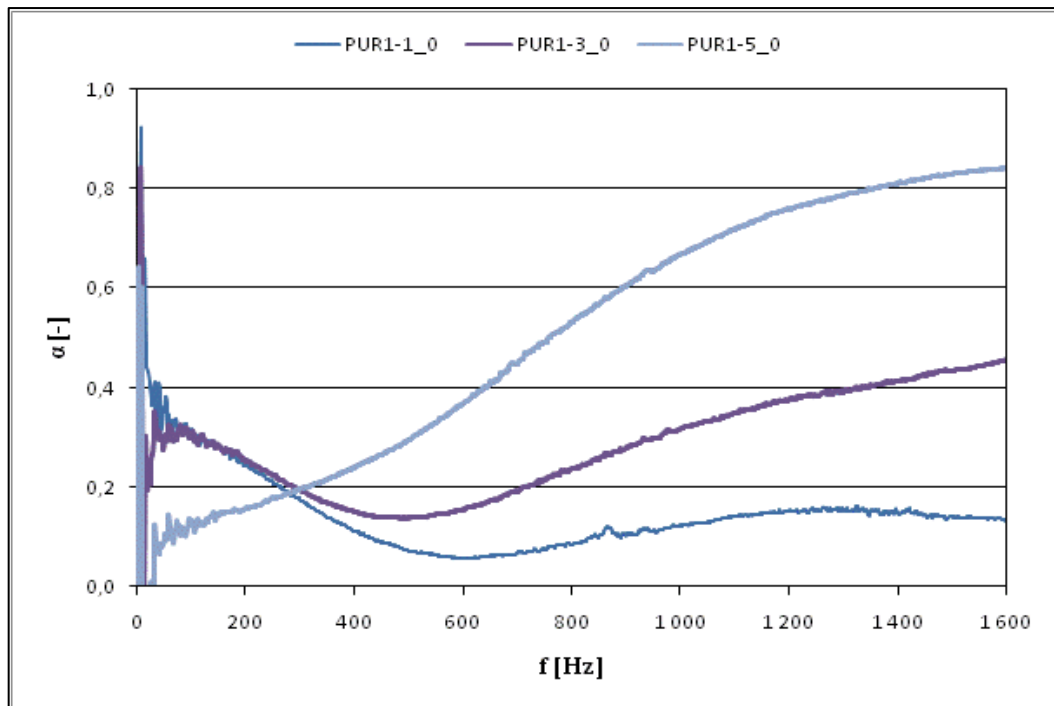
Zástupce elastomerů (*PR4-2*) je nejvíce náchylný na vzdálenost vzduchové mezery, jak je patrné z grafu frekvenční závislosti. Umístěním vzduchové mezery se sice zvýšila pohltivost při menších kmitočtech, při vyšších se výrazně zhoršila.



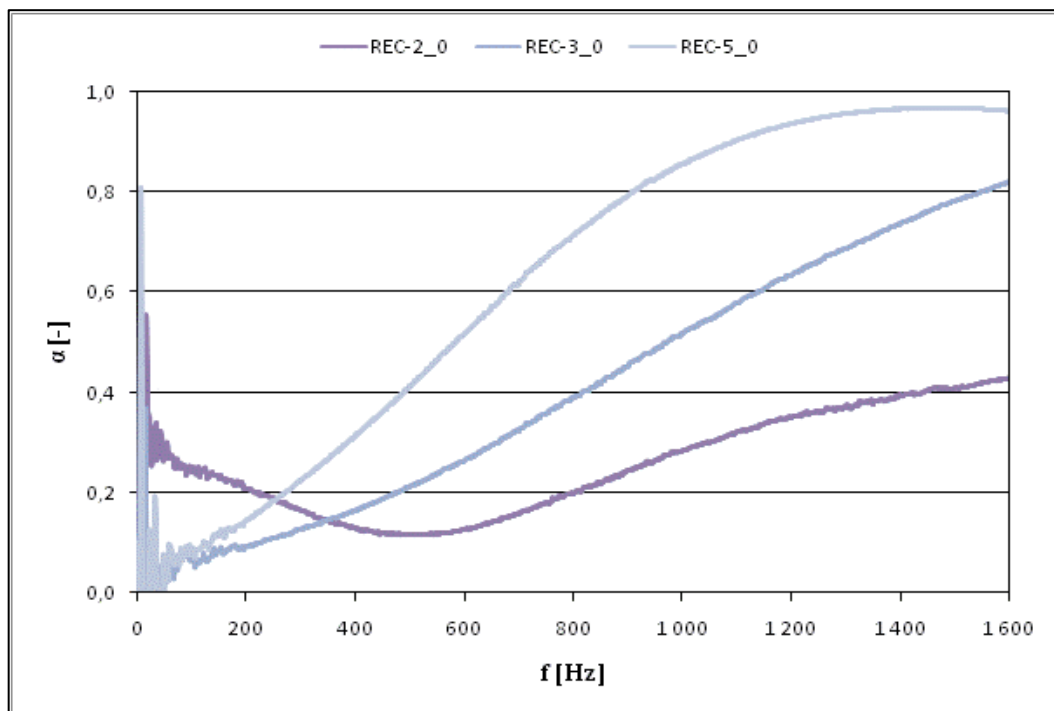
Graf 20 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM pro REC-5\_x ; PR4-2\_x



### 6.1.3 Vliv tloušťky



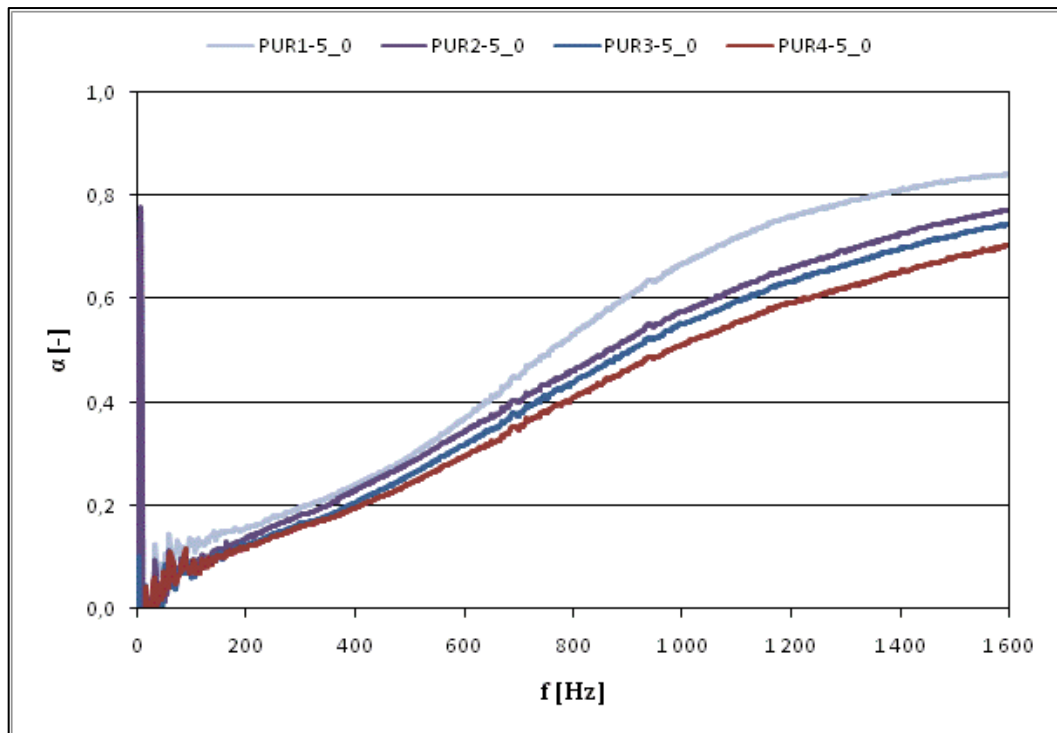
Graf 21 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tloušťky pro PUR1-t\_0



Graf 22 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tloušťky pro PUR1-t\_0

Z těchto grafů frekvenční závislosti můžeme jednoznačně konstatovat, že tloušťka izolační vrstvy hraje velice pozitivní roli v pohlcování zvuku, a to hlavně v oblastech vysokých frekvencí. Z ekonomického hlediska je to však finančně náročnější.

### 6.1.4 Vliv pórovitosti

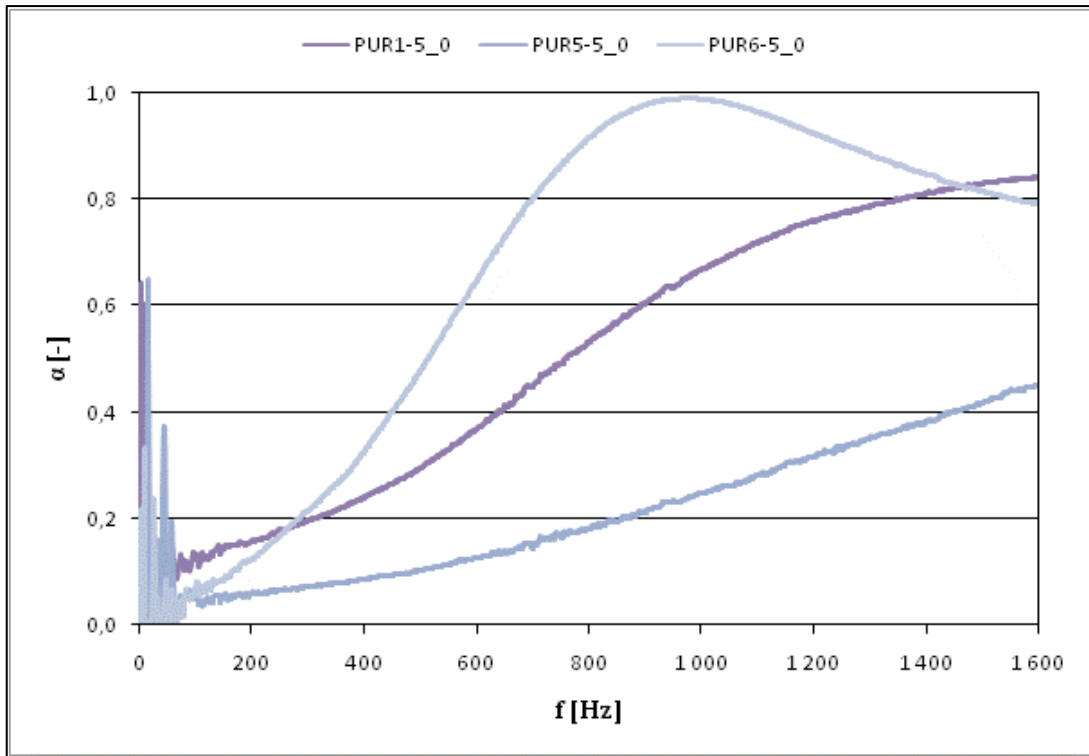


Graf 23 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pórovitosti pro PUR pěny

Do tohoto experimentu jsem zahrnul polyuretanové pěny stejné šířky ( $t = 5$  cm), ale s odlišnou pórovitostí. Tím se nemyslí jen velikost pórů, ale také jejich orientace. Nejlepší zvukové pohltivosti jsme dosáhli u vzorku nejjemnějšími póry, dále pak s polohrubými, hrubými a velmi hrubými nakonec. Všechny tyto pěny vykazují samozřejmě dobré vlastnosti pohlcování a z grafu je patrné, že čím jemnější póry, tím více akustické energie se mění na teplo, a tím se zvyšuje pohltivost. Oproti tomu, velké póry budou mít za následek snadnější prostup akustické energie.

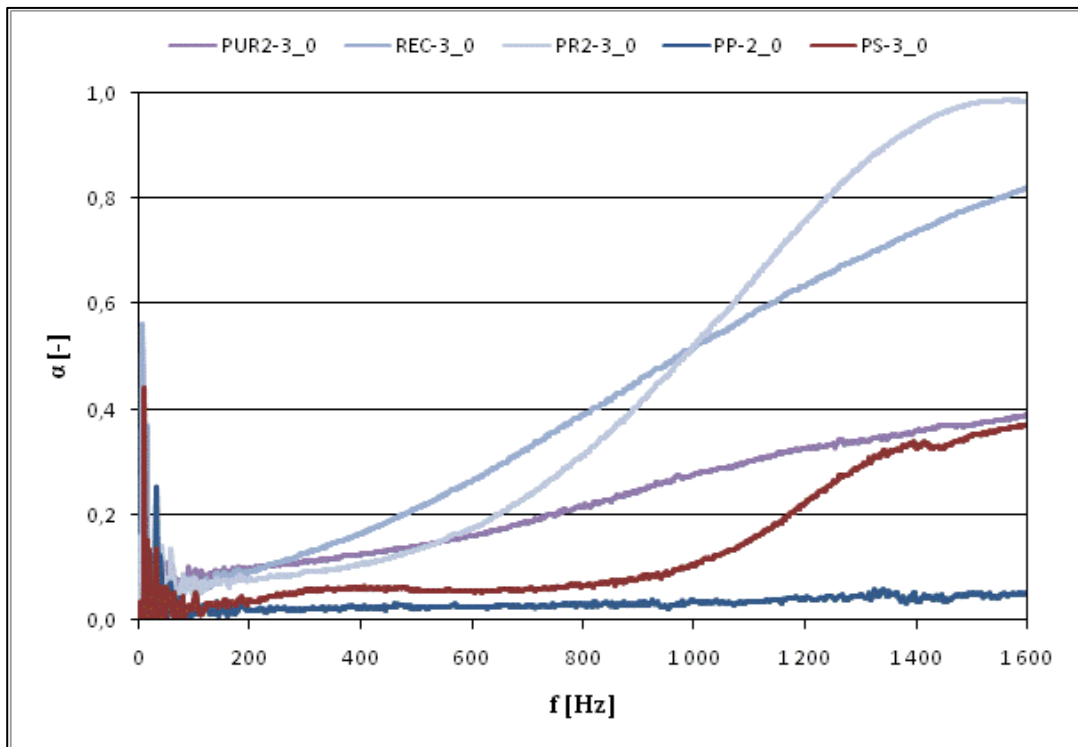
### 6.1.5 Vliv tvaru povrchu

V předešlém experimentu jsme si ověřili absorpční vlastnosti jemně pórovitých materiálů. Zkusme tyto vlastnosti ještě vylepšit změnou dopadové plochy z rovinné na tvarovou. Do následujícího pokusu jsem zahrnul PUR pěnu stejné maximální tloušťky, ale různého tvaru povrchu. Zvukové vlny se nejvíce pohltily vzorkem s vlnitou dopadovou plochou, což jsme předpokládali. Zvuková vlna se totiž při dopadu na vlnitý povrch již neodráží jen zpět, ale tentokrát do různých směrů, z nichž mnoho je např. protilehlá vlna na povrchu vzorku, čímž ztrácí svou akustickou energii.



Graf 24 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tvaru povrchu pro PUR pěny

### 6.1.6 Ekonomika recyklátů



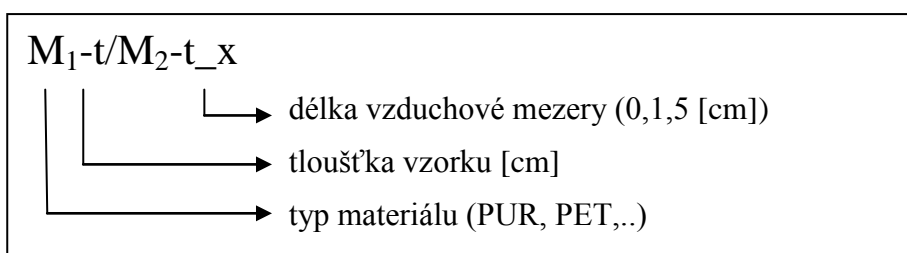
Graf 25 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. – ekonomika recyklátů vzhledem k jiným druhům mat.

Protože poločas rozpadu polymerních látek je markantní, je dobré uvažovat o jejich recyklaci. Recyklováním PUR pěny jsme získali zdaleka nejlepší zvukovou pohltivost, jak lze porovnat na příslušném grafu. V recyklátech hraje důležitou roli také pojivo, to znamená, že na některých místech se chová téměř jako pryž, což má za následek perfektní tlumení vysokých frekvencí.

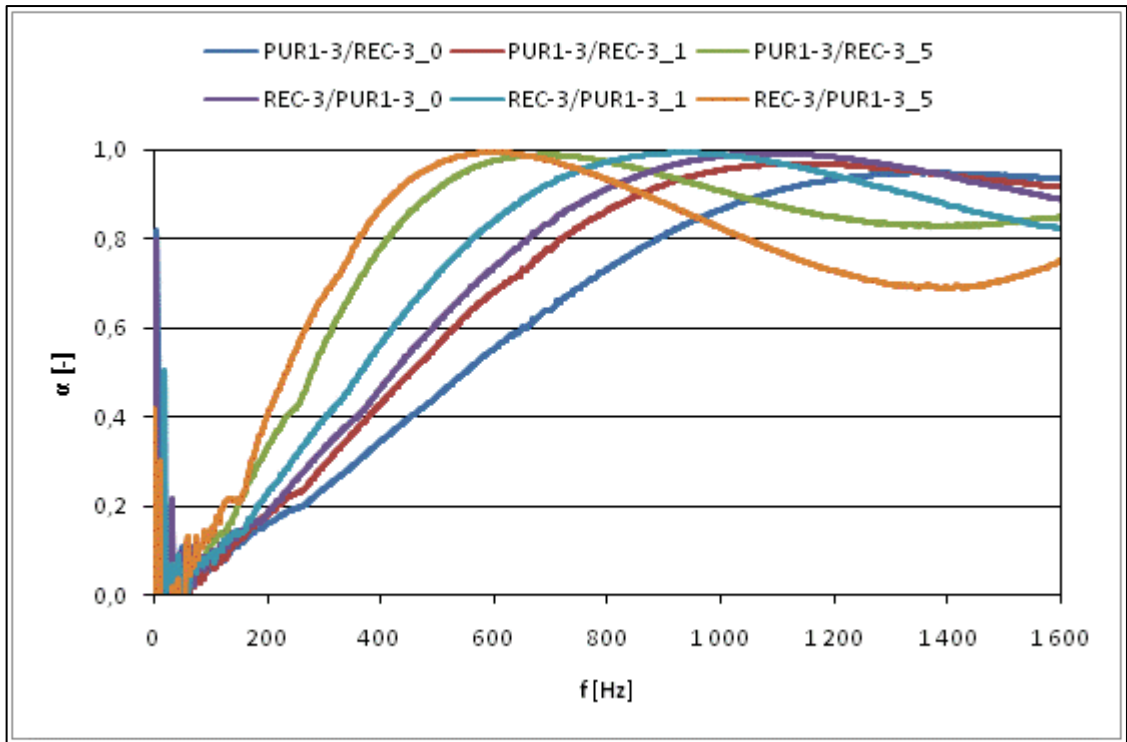
## 6.2 Sendvičové kombinace

Dvouvrstvá kombinace	
Kombinace	Označení
PUR - Recyklát PUR	PUR1-3/REC-3_x
	REC-3/PUR1-3_x
PUR - PS	PS-3/PUR2-3_x
	PUR2-3/PS-3_x
PUR - PET	PET-2/PUR4-5_x
	PUR4-5/PET-2_x
Pryž - PUR Vlnky	PUR6-5/PR4-2_x
PUR - Korek \ textil	TEKO-1/PUR3-5_x
	KOTE-1/PUR3-5_x
	PUR3-5/TEKO-1_x
	PUR3-5/KOTE-1_x
Pryž - PMMA	PMMA-2/PR1-2_x
	PR1-2/PMMA-2_x
Recyklát PUR - PP	REC-2/PP-2_x
	PP-2/REC-2_x
PS - PMMA	PMMA-2/PS-3_x
	PS-3/PMMA-2_x

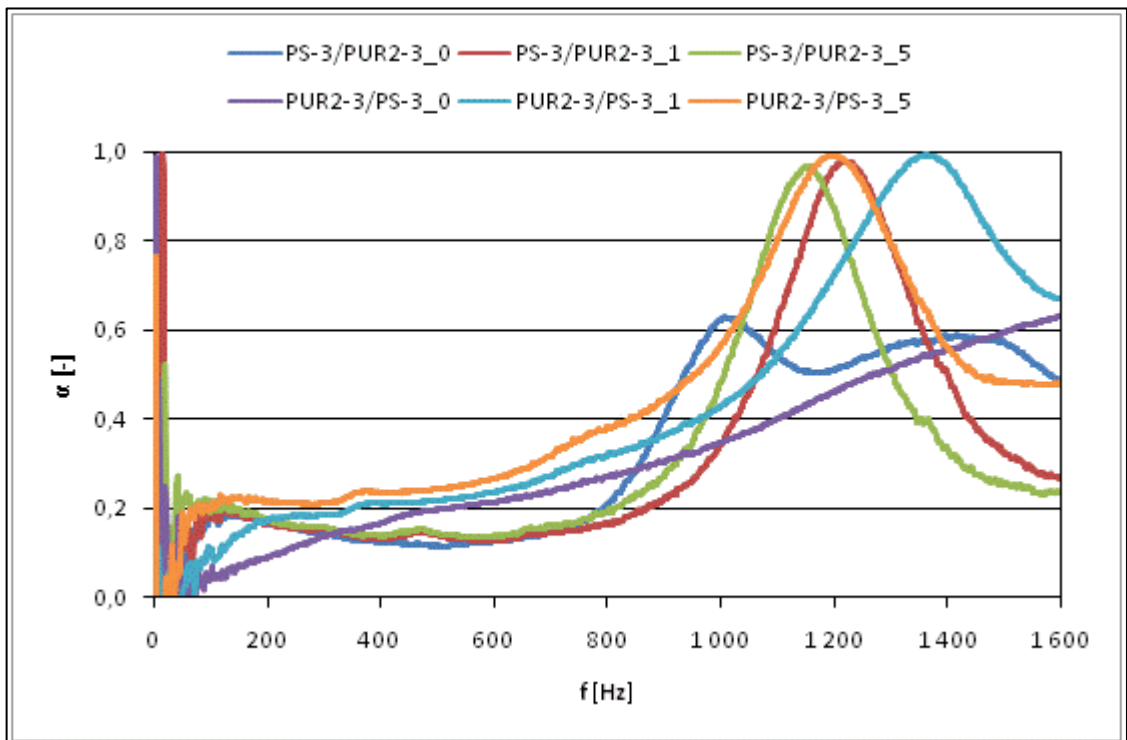
Tabulka 7 – Přehled materiálů v dvouvrstvé kombinaci



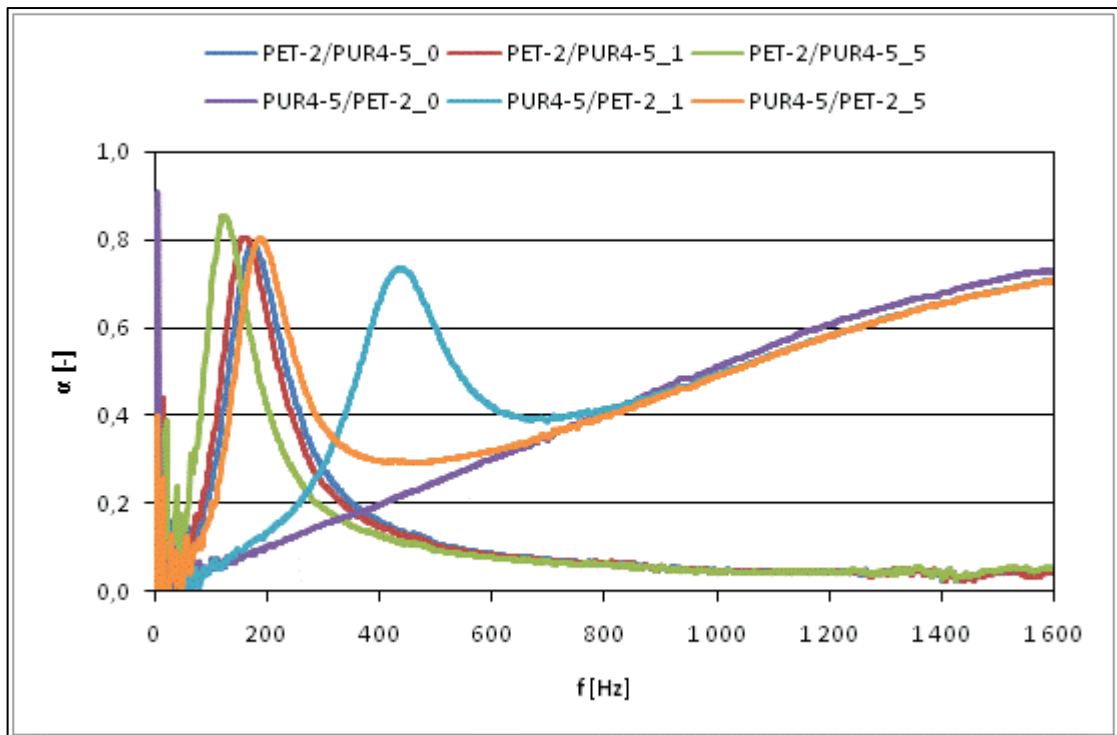
## 6.2.1 Dvouvrstvé kombinace



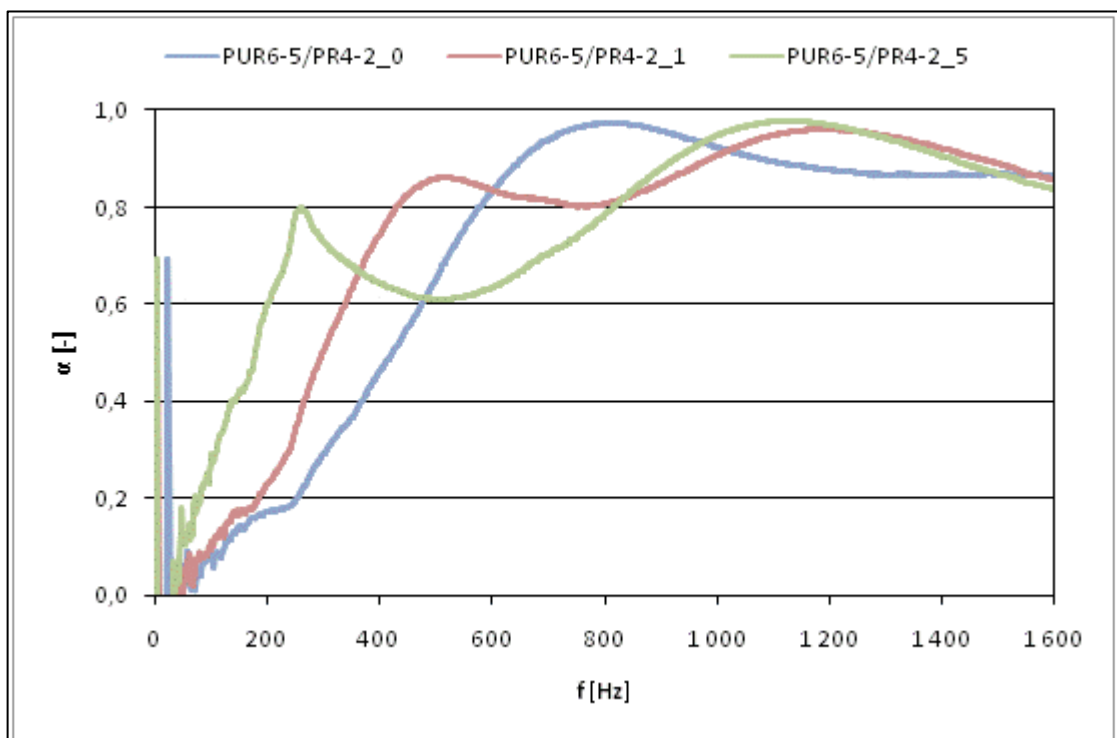
Graf 26 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR1-3/REC-3\_x



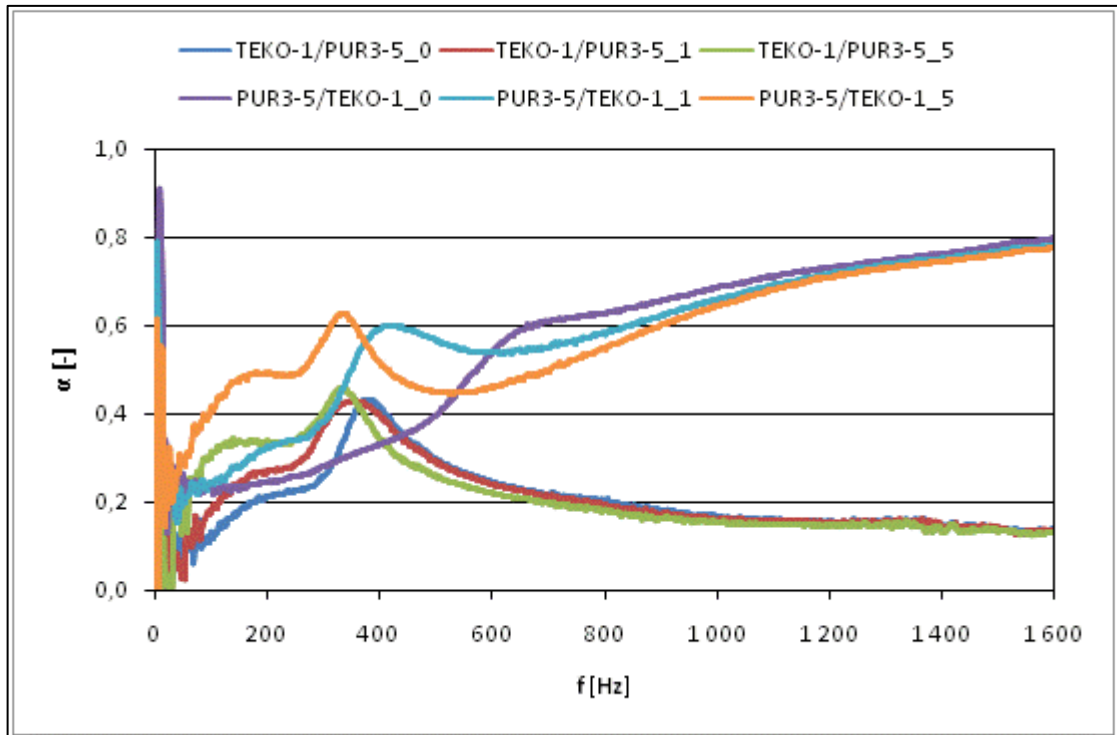
Graf 27 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3 / PUR2-3\_x



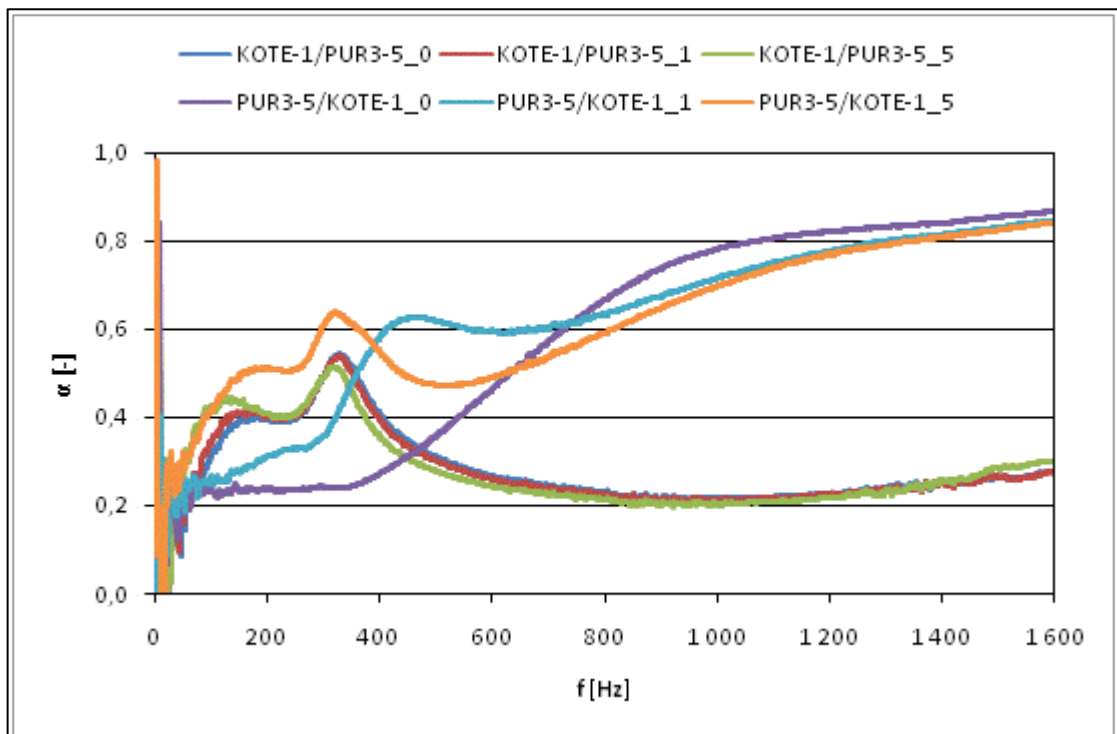
Graf 28 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PET-2/PUR4-5<sub>x</sub>



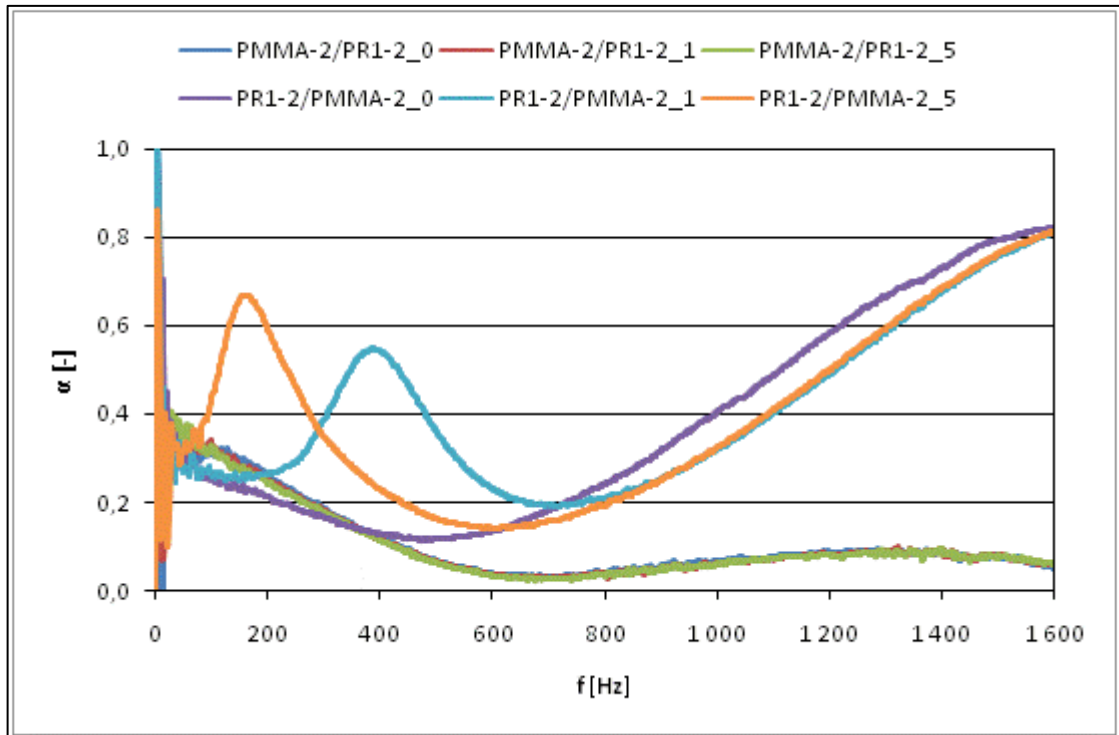
Graf 29 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR4-5<sub>x</sub> (jeden směr)



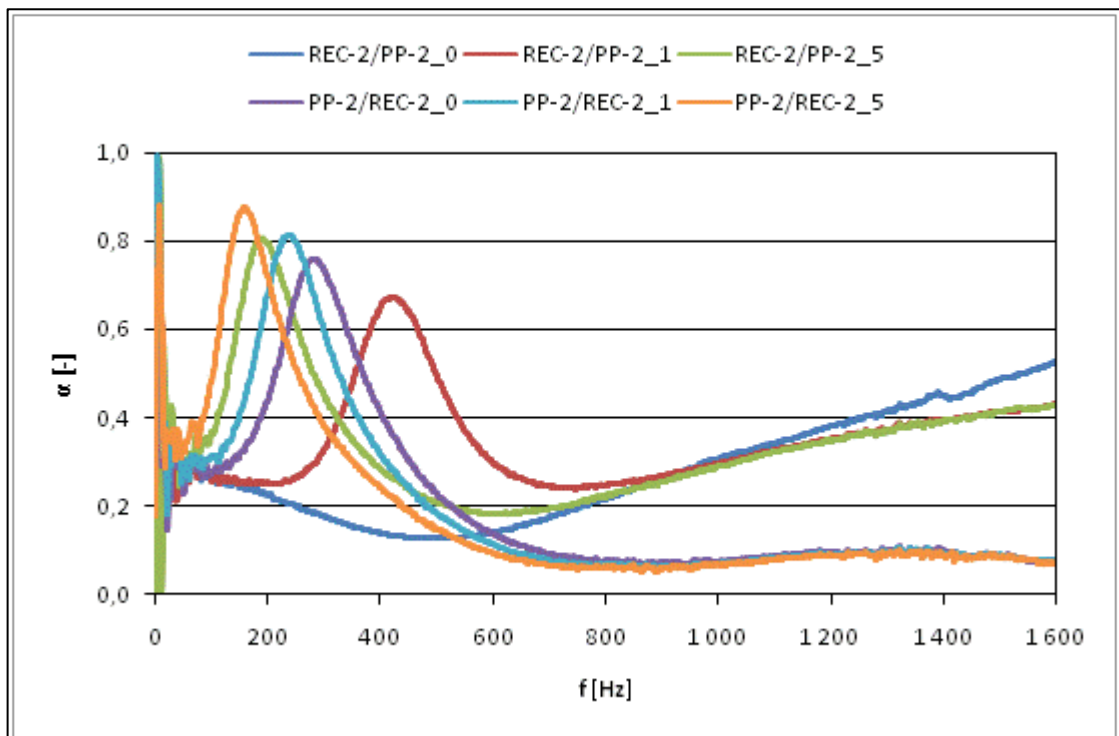
Graf 30 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace TEKO-1/PUR3-5\_x



Graf 31 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace KOTE-1/PUR3-5\_x

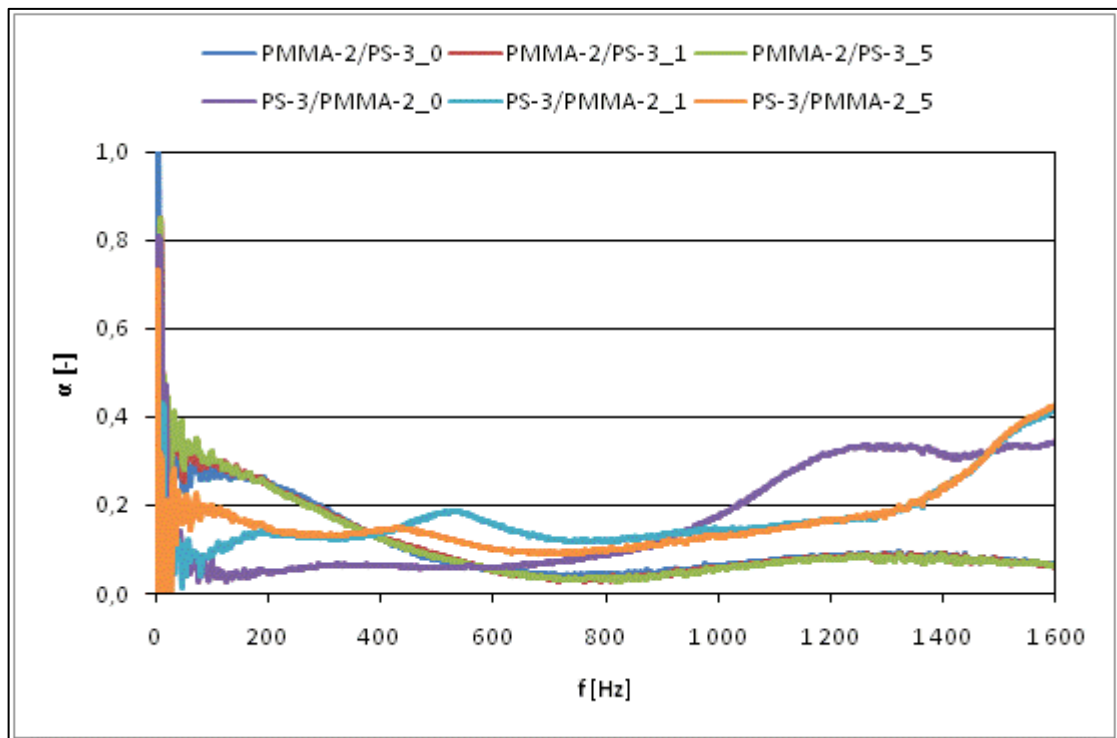


Graf 32 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PMMA-2/PR1-2\_x



Graf 33 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace REC-2/PP-2\_x





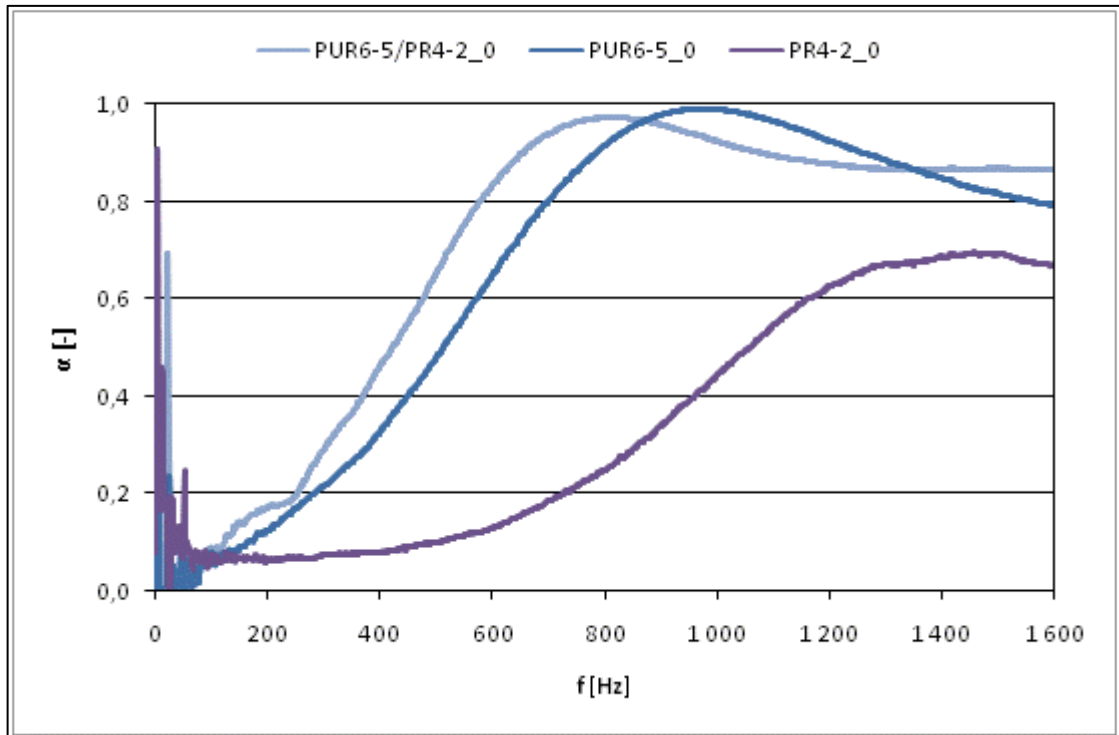
Graf 34 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace (PMMA-2/PS-3\_x)

V praxi se většinou setkáváme s různými vícevrstevnými, tzv. sendvičovými materiály. Vhodnou kombinací dvou i více vrstev můžeme dosáhnout lepších vlastností zvukového pohlcování při zachování stejné tloušťky zvukoizolační vrstvy. Experimentoval jsem opět se vzduchovou mezerou, ale hlavní důraz jsem kladl na kombinace dvou a tří vrstev, přičemž u dvouvrstevných kombinací bych rád demonstroval vliv pořadí materiálů.

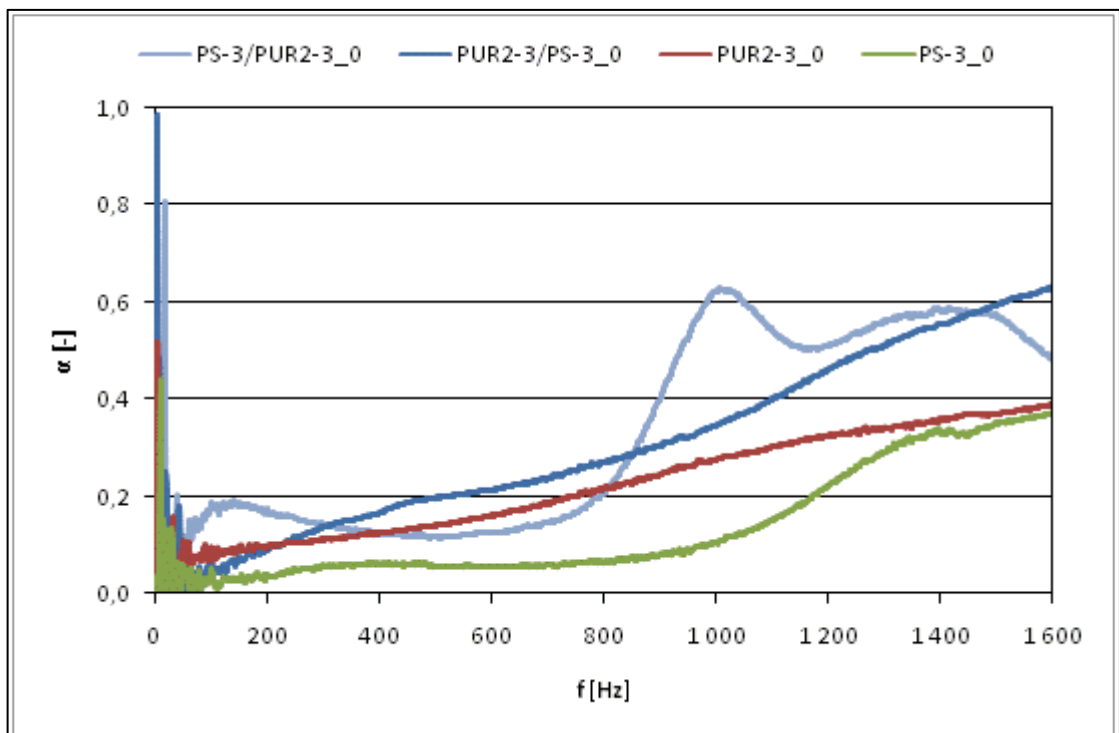
#### 6.2.1.1 Porovnání se samostatnými materiály

Jak již bylo řečeno, vhodnou kombinací vrstev můžeme dosáhnout lepších zvukoizolačních vlastností, než je tomu u samostatných materiálů. V prvním případě jsem zkombinoval polyuretanovou pěnu s vlnitým povrchem a pryží. Výsledek je velice uspokojující, neboť PUR s vlnou na povrchu sám o sobě perfektně tlumí pásmo středních frekvencí a v kombinaci s pryží jsme dosáhli i výraznějšího zlepšení zvukové izolace při vyšších kmitočtech.

Na druhém grafu je znázorněna frekvenční závislost kombinace PS a PUR. Opět nastalo zlepšení vlastnosti pohlcování zvuku, čímž jsme dokázali výhodu kombinování materiálů.



Graf 35 – Porovnání frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR4-2\_0 se samostatným materiálem

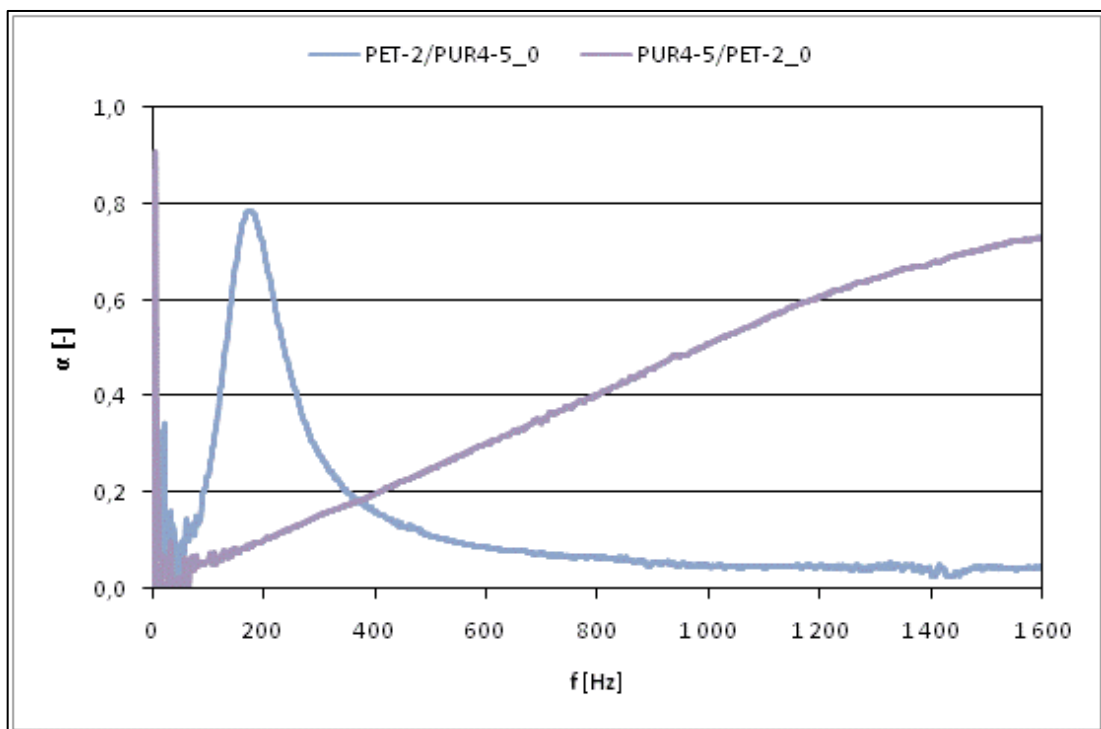


Graf 36 - Porovnání frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/PUR2-3\_0 se samostatným materiálem

### 6.2.1.2 Vliv pořadí materiálů

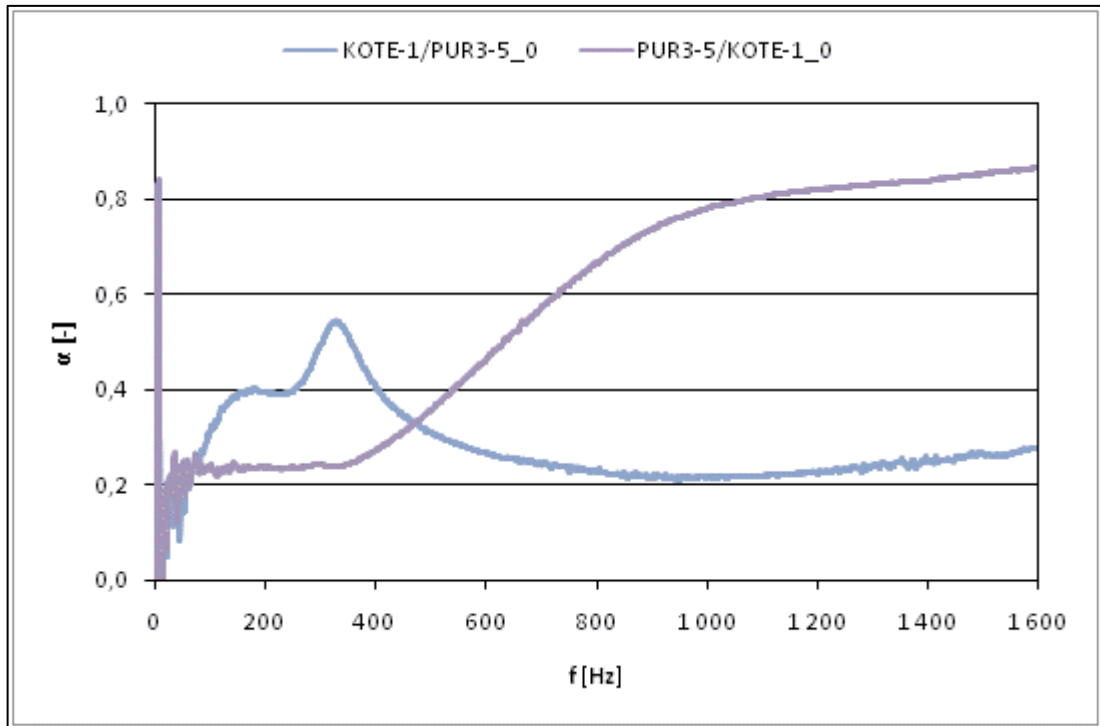
Vliv pořadí materiálů je již patrný z předchozího grafu, kde jsme porovnávali vlastnosti se samostatným materiálem, kdy došlo k viditelnému zlepšení vlastností zvukové pohltivosti v oblasti okolo frekvence 1000 Hz.

Demonstrujme si tuto problematiku mnohem názorněji na příkladu kombinace pevného (*PET-2*) a pěnového materiálu (*PUR4-5*). V prvním případě dopadá akustická vlna nejprve na PET, kdy se většina akustické energie pohltí. Toto rozmezí není příliš velké a brzy se vrací do původních vlastností materiálu PET, což je, že se převážně zvuk odrazí. V druhém případě máme PET až za PUR pěnou a na tu dopadne akustická vlna jako první. Zvuková pohltivost obecně vzrůstá, nicméně není příliš účinná a ani cenově výhodná.



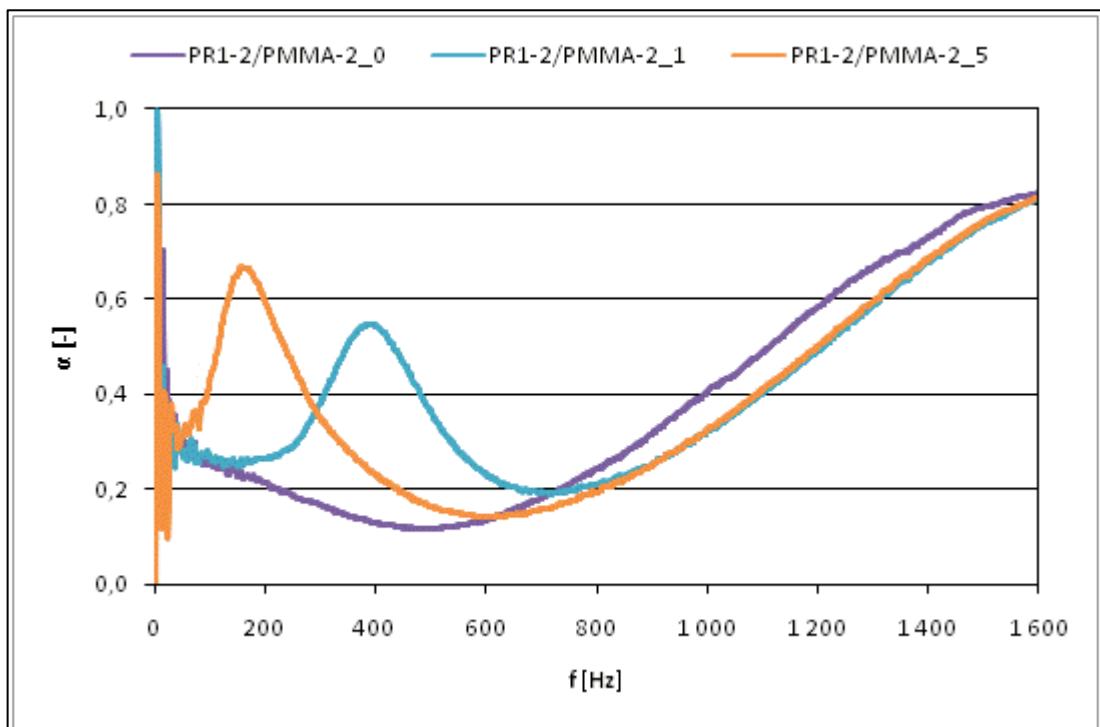
Graf 37 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pořadí kombinace PET-2/PUR4-5\_0

Druhý graf opět ukazuje, jak markantní rozdíl má pořadí materiálů v sendvičové kombinaci. Tentokrát jsem zkombinoval PUR pěnu s korkem, jehož jeden povrch byl pokryt textilní látkou. Tato textilní látka dobře odrážela zvuk, a proto se hodí spíše na konec.



Graf 38 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pořadí kombinace KOTE-1/PUR3-5\_0

### 6.2.1.3 Vliv vzduchové mezery



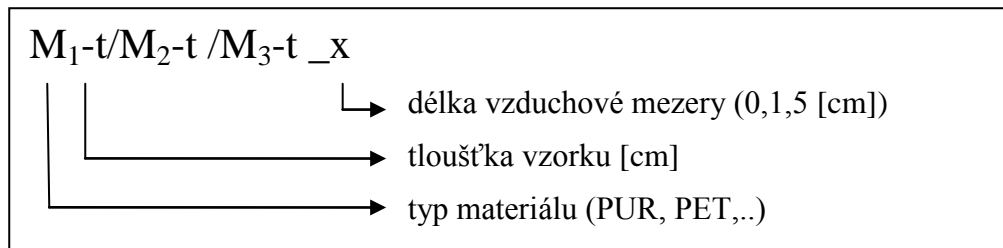
Graf 39 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM kombinace PR1-2/PMMA-2\_x

Stejně jako u jednotlivých materiálů, i zde u sendvičových kombinací platí, že vzduchová mezera způsobuje zlepšení zvukoizolačních vlastností při nižších frekvencích.

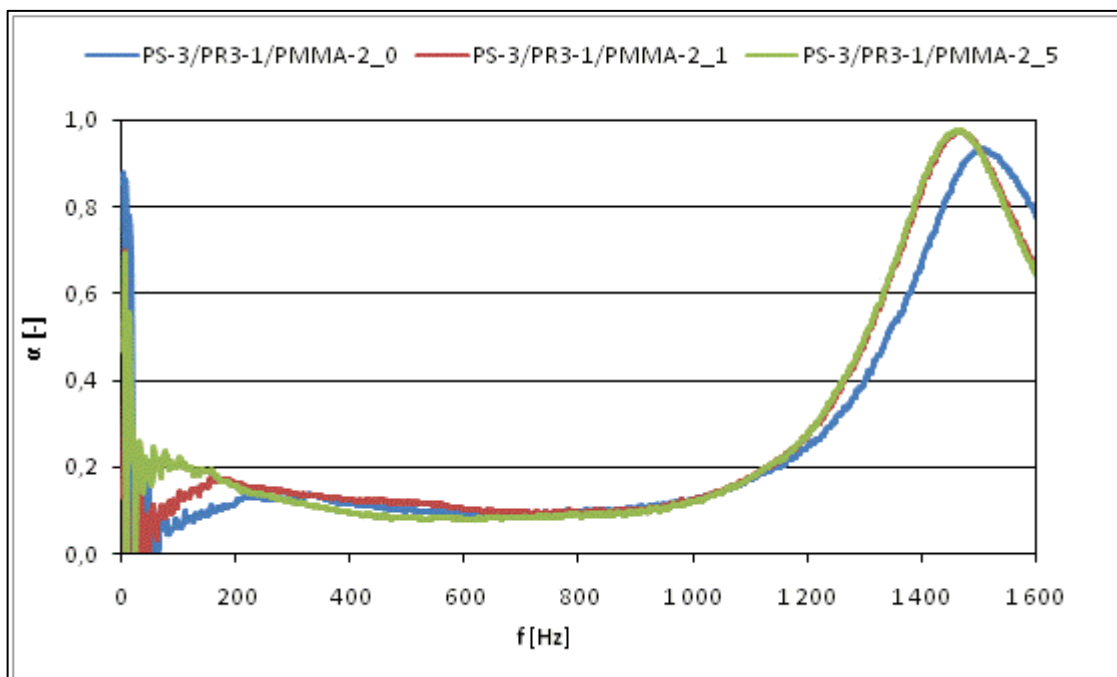
### 6.2.2 Třívrstvé kombinace

Třívrstvé kombinace	
Složení sendviče	Označení
PS - Pryž - PMMA	PS-3/PR3-1/PMMA-2_x
Recyklát - PS - Korek \ textil	REC-2/PS-2/KOTE-1_x
PUR vlny - pryž - PP	PUR6-5/PR3-1/PP-2_x
Korek s textilem - PUR - PET	TEKO-1/PUR3-5/PET-2_x
PS - skelná vata - PP	PS-3/SV-5/PP-2_x
PUR - Pryž - PS	PUR4-5/PR2-3/PS-3_x
PUR vlny - PS - PMMA	PUR6-5/PS-3/PMMA-2_x

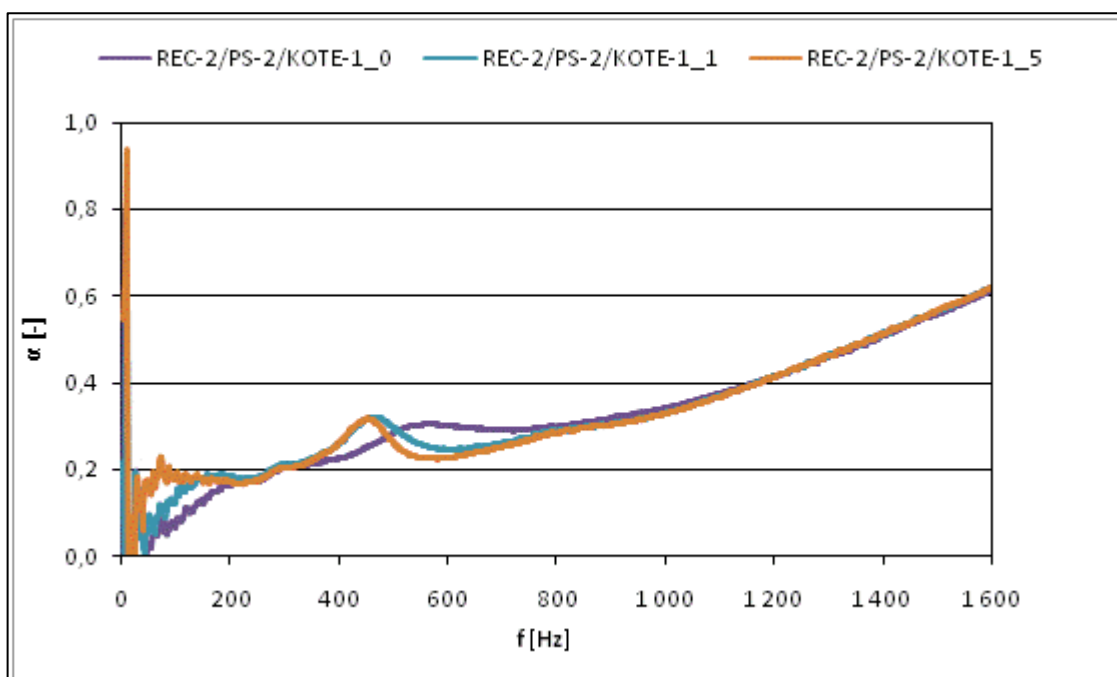
Tabulka 8 – Přehled třívrstvých kombinací materiálů



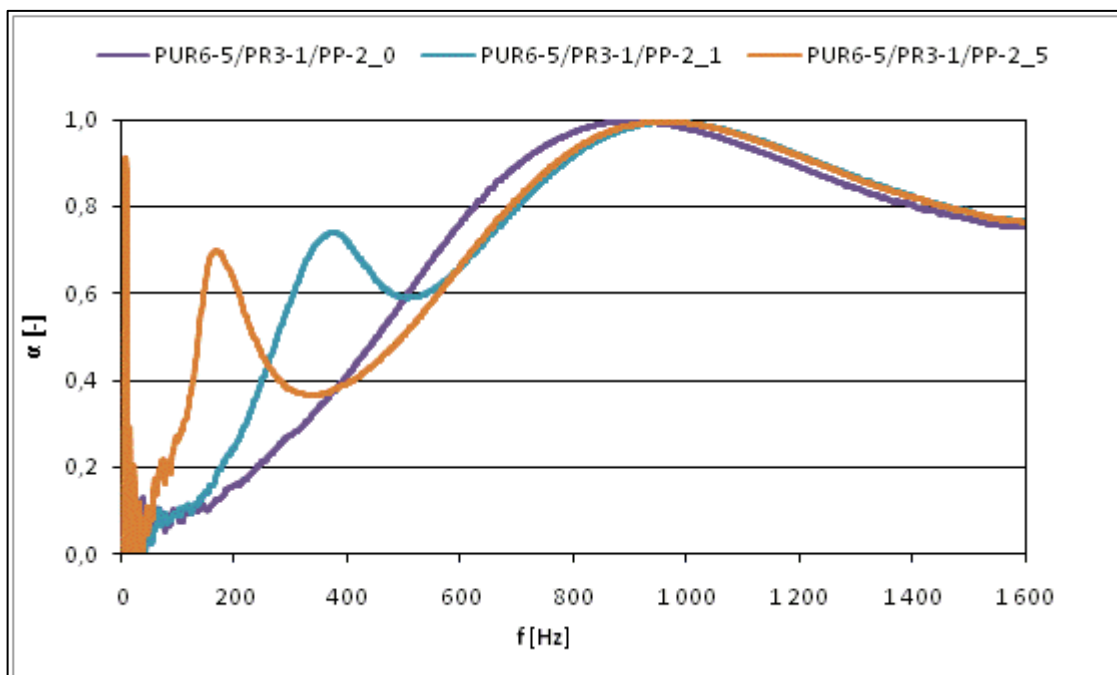
Smyslem tohoto experimentu, kdy kombinuji tři různé materiály, bylo, zda se tato sendvičová kombinace vyplatí, a to převážně z ekonomického hlediska. Experiment probíhal opět s různou vzduchovou mezerou



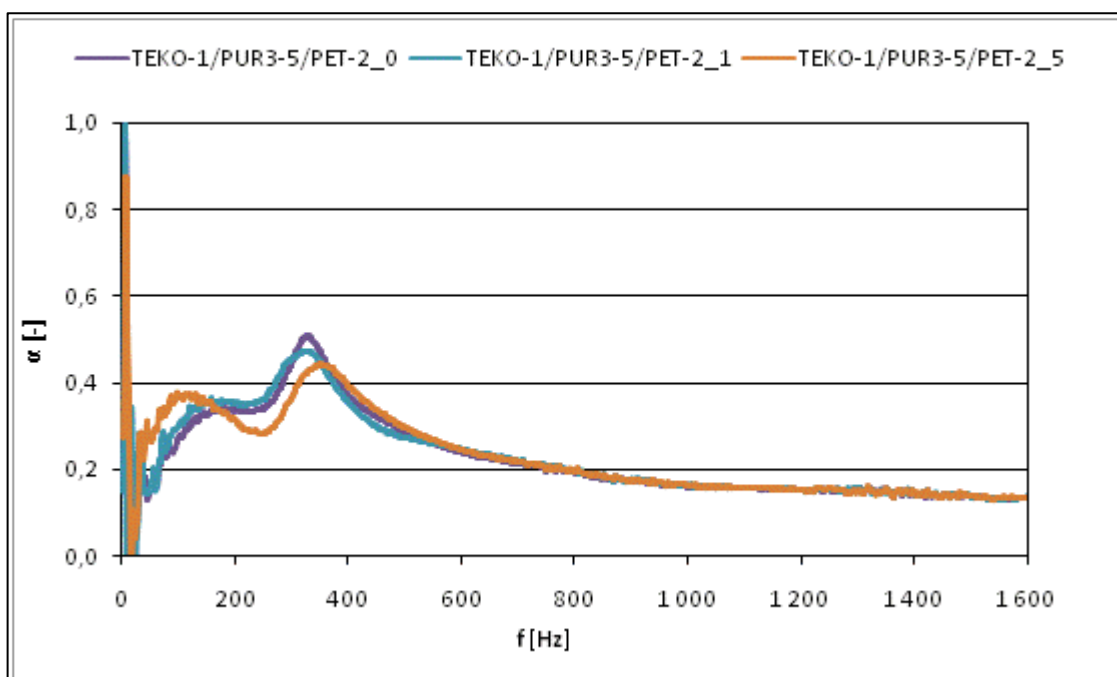
Graf 40 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/PR3-1/PMMA-2\_x



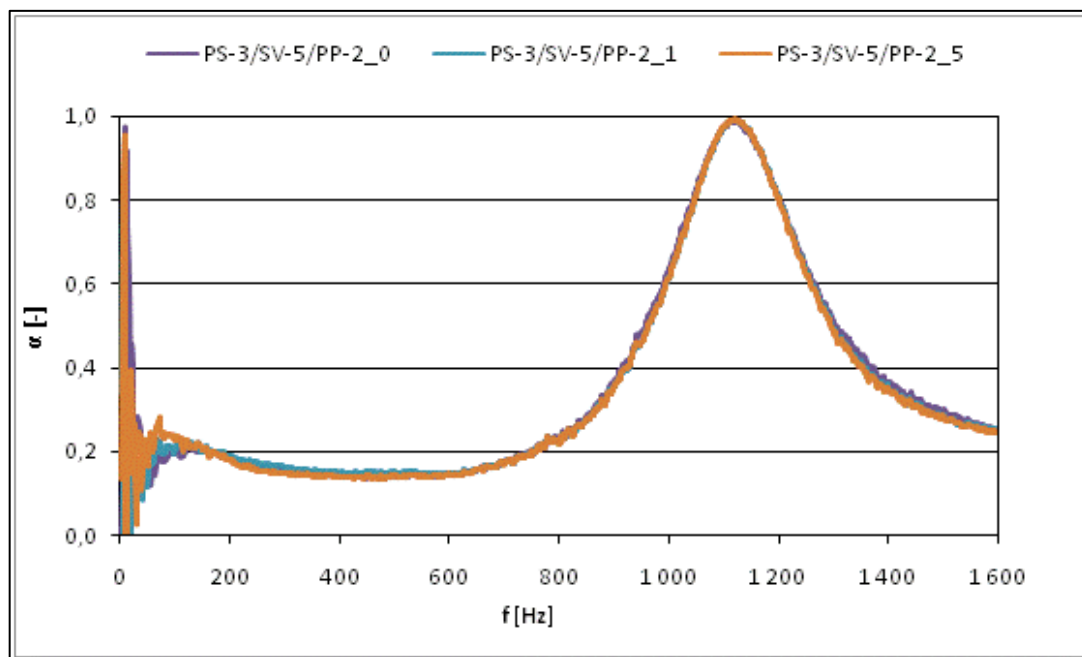
Graf 41 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace REC-2/PS-2/KOTE-1\_x



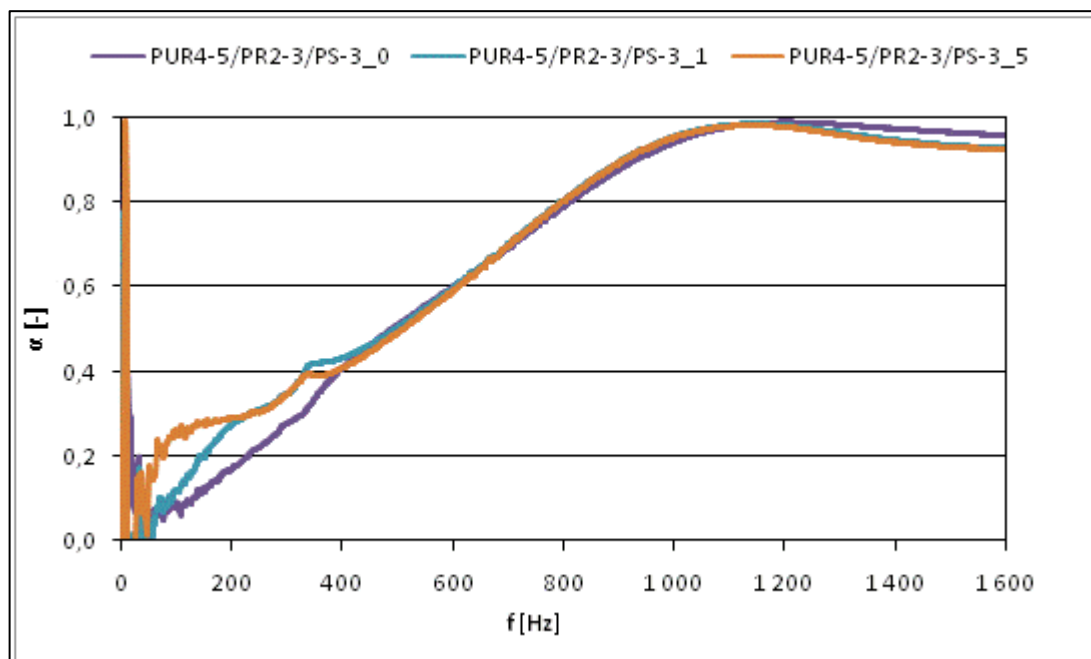
Graf 42 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR3-1/PP-2\_x



Graf 43 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace TEKO-1/PUR3-5/PET-2\_x

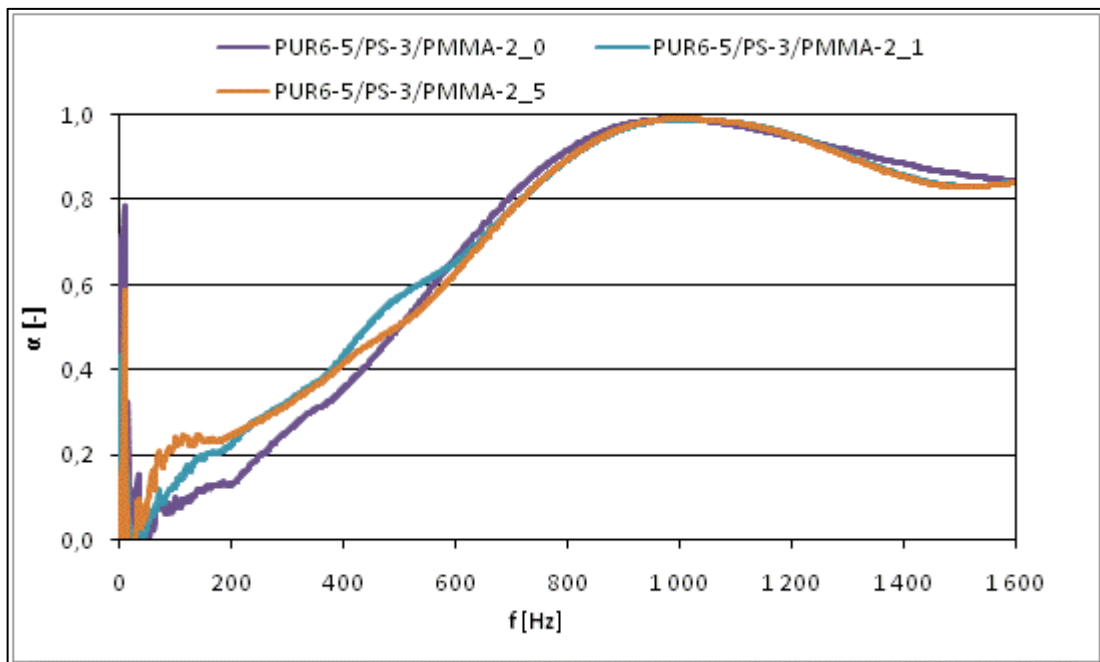


Graf 44 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/SV-5/PP-2\_x



Graf 45 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR4-5/PR2-3/PS-3\_x





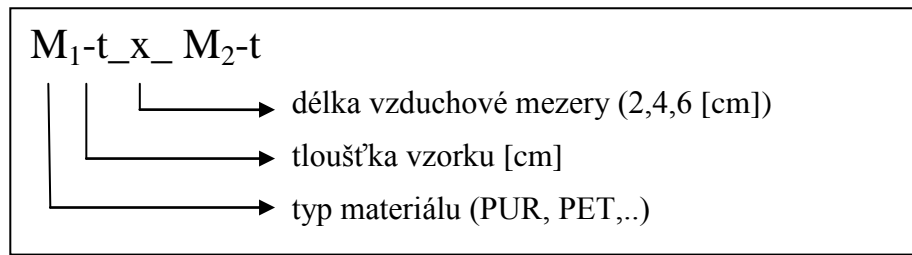
Graf 46 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PS-3/PMMA-2\_x

Na základě výše uvedených grafů frekvenčních závislostí činitele zvukové pohltivosti lze konstatovat, že nejvýhodnější je kombinovat materiály tak, aby akustická vlna dopadala nejprve na pěnový materiál (např. PUR), dále materiál elastický (např. pryž) a sendvičovou kombinaci završit materiálem, který dobře akustickou energii odrazí. Tato energie je pak nucena se odrazit zpět do elastomeru a pěny, kde se pohltí téměř všechna při středních a vysokých kmitočtech. Vliv vzduchové mezery je znatelný, ale v případech, kdy akustická vlna nedopadala nejprve na PUR pěnu, byl její vliv téměř zanedbatelný.

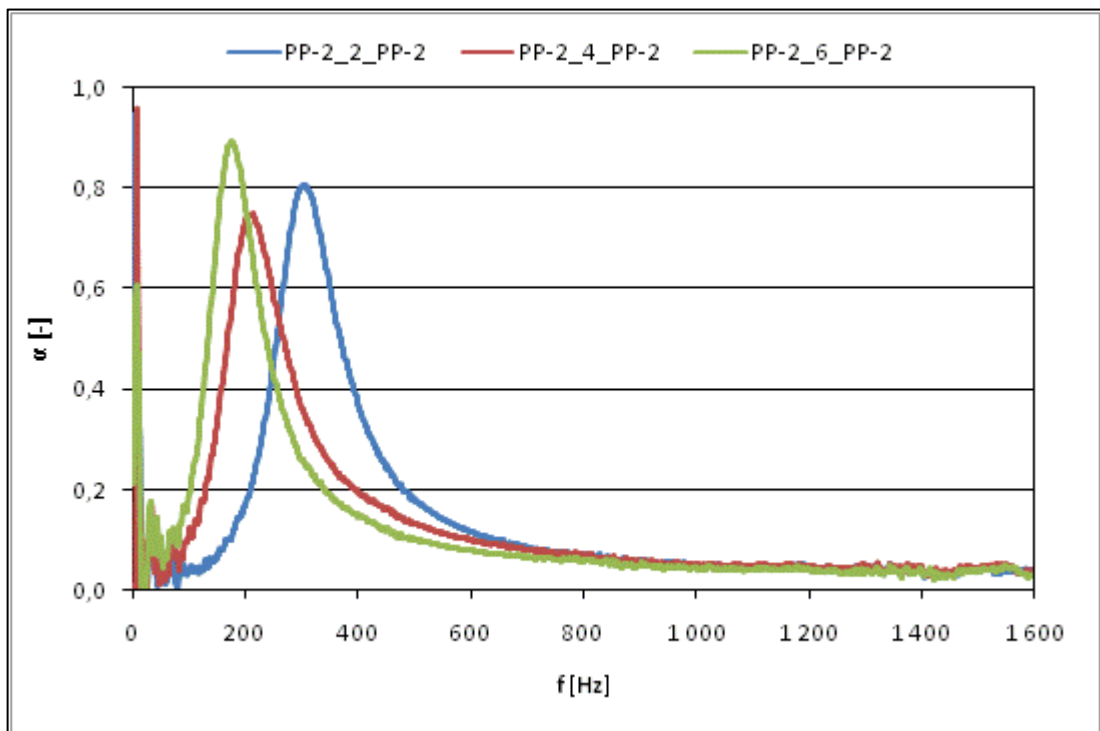
### 6.2.3 Kombinace dvou vzorků se vzduchovou mezerou uprostřed

Vzduchová mezeza mezi dvěma vzorky	
Kombinace	Označení
PP - PP	PP-2_x_PP-2
Pryž - Pryž	PR3-1_x_PR3-1
rec - rec	REC-2_x_REC-2
PUR - PUR	PUR1-1_x_PUR1-1
PUR vlny - Korek \ textil	PUR6-5_x_KOTE-1
pryž - PET	PR2-3_x_PET-2
PUR - PS	PUR2-5_x_PS-3

Tabulka 9 – přehled kombinace vzorků se vzduchovou mezerou uprostřed

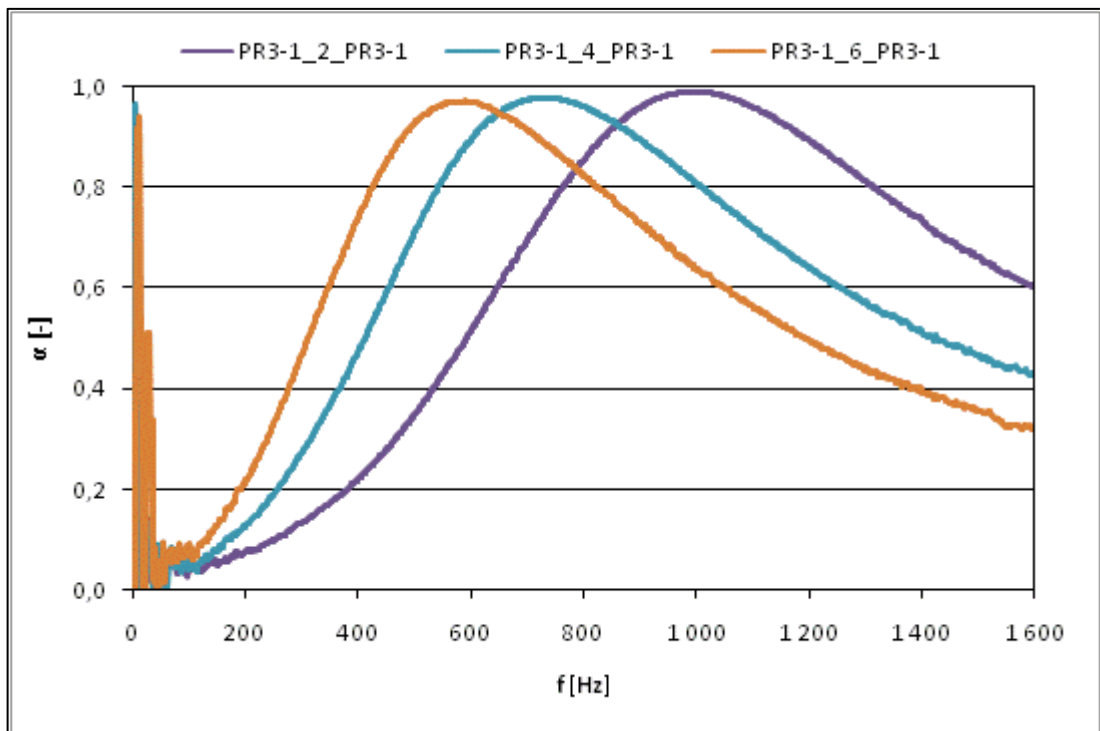


Poslední experiment se týká kombinování dvou materiálů, opět se vzduchovou mezerou, která byla umístěna mezi těmito materiály.

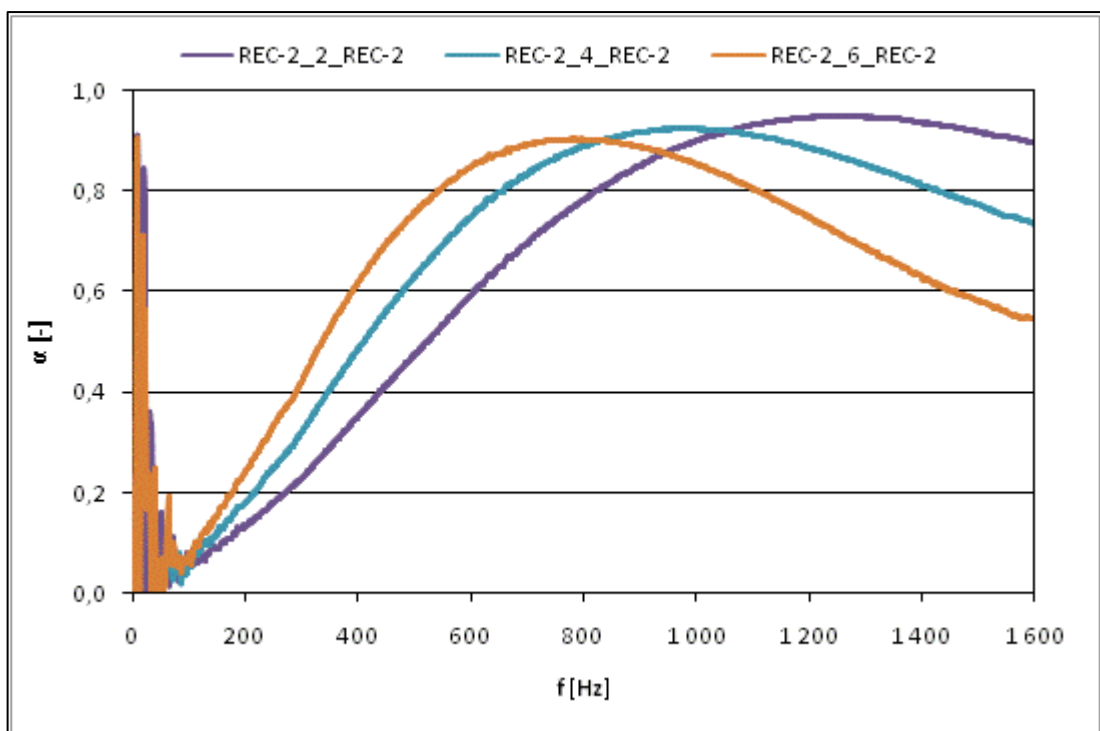


Graf 47 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PP-2\_x\_PP-2

První vzduchovou mezeru jsme umístili mezi dva stejné pevné materiály (**PP-2**), čímž jsme si osvojili znalost jejího vlivu na pohlcování zvuku při nízké frekvenci.

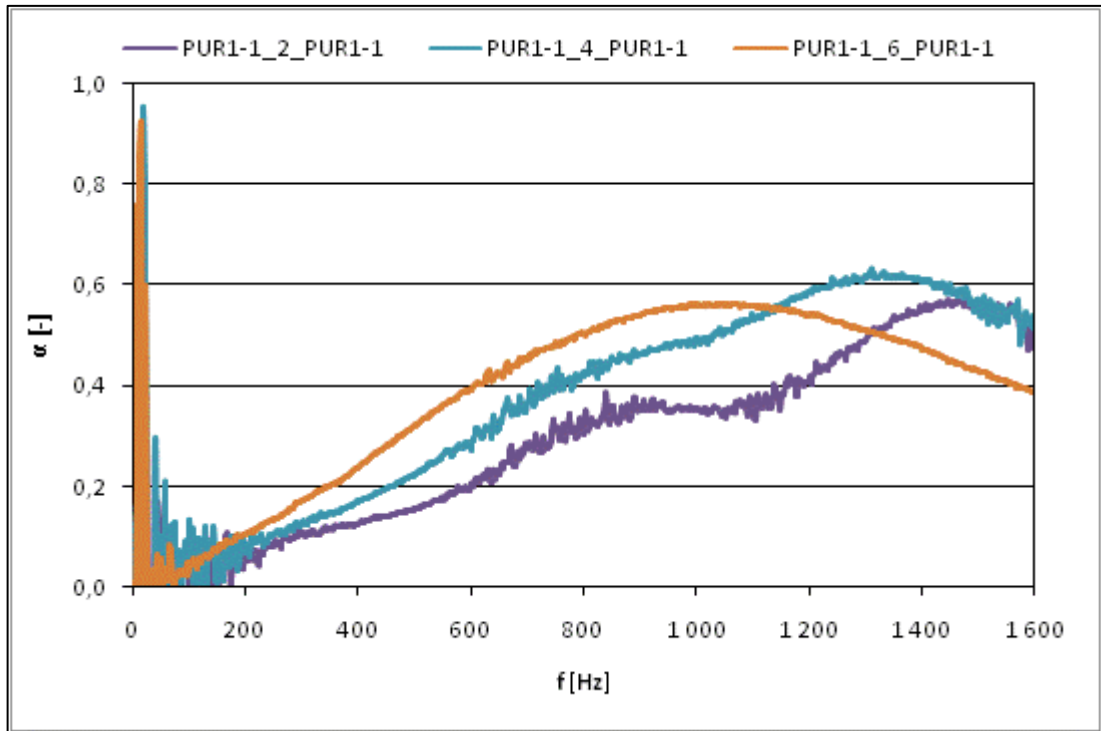


Graf 48 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PR3-1\_x\_PR3-1

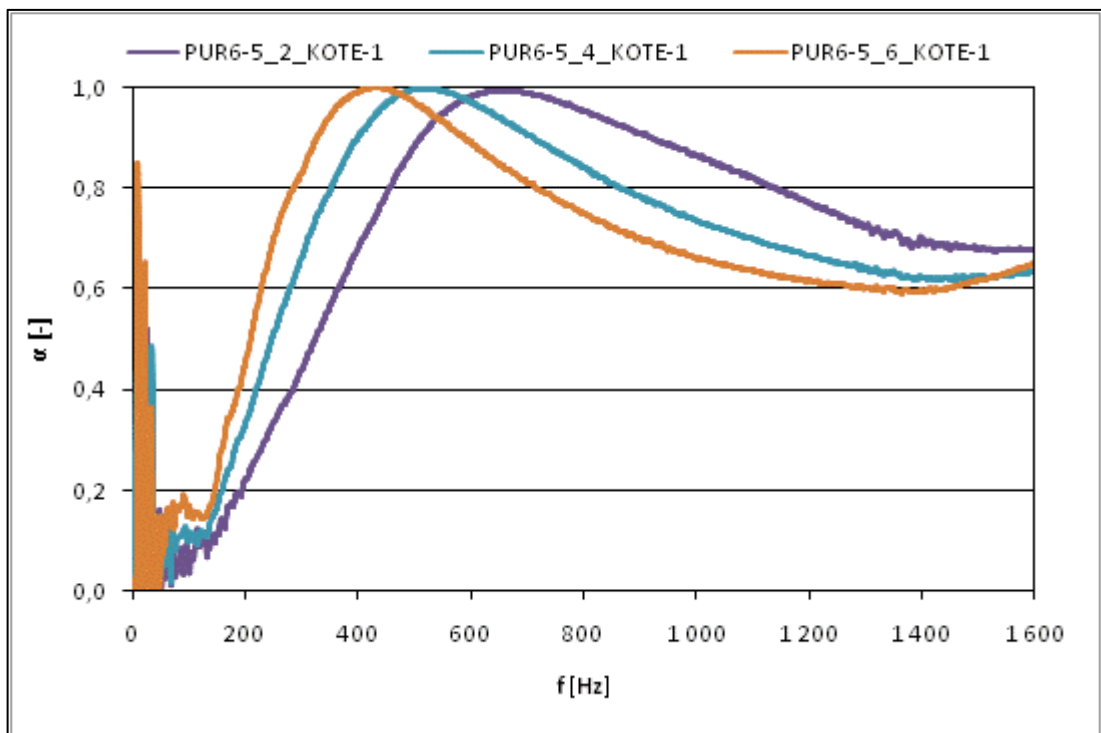


Graf 49 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací REC-2\_x\_REC-2

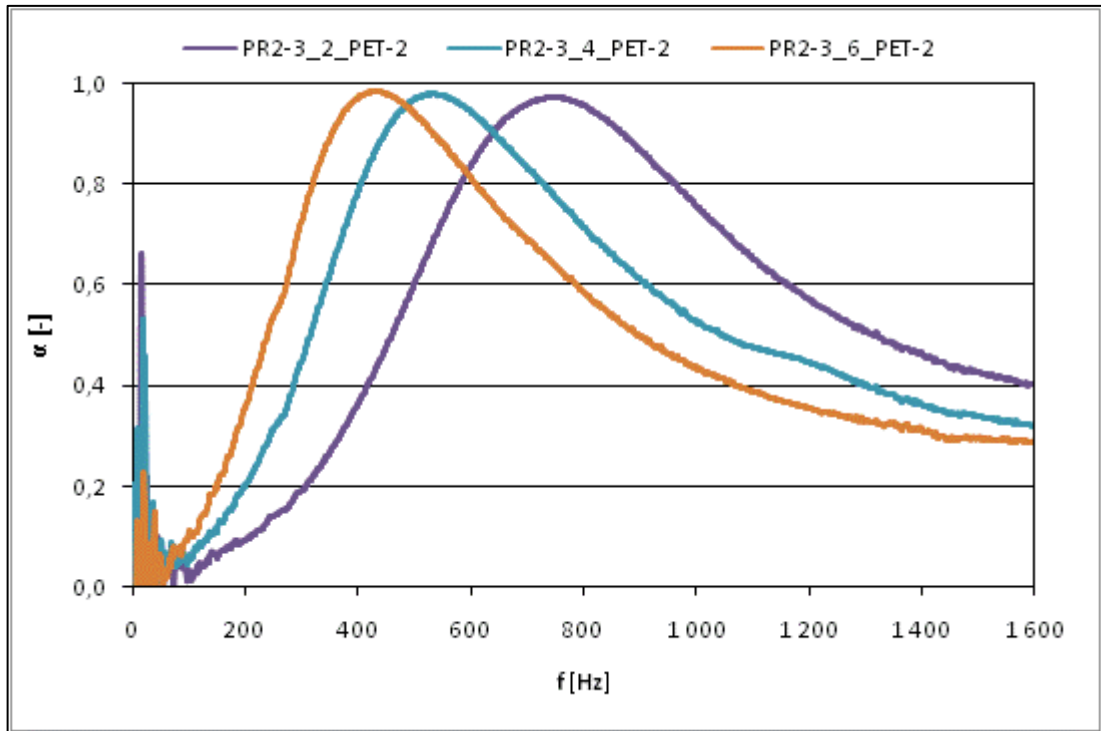
O částečné podobnosti ve zvukové pohltivosti mezi elastomery a recykláty PUR jsem se již zmiňoval. V těchto grafech to lze na první pohled snadno vyčíst. Recykláty ale opět lépe pohlcují zvuk při vyšších frekvencích.



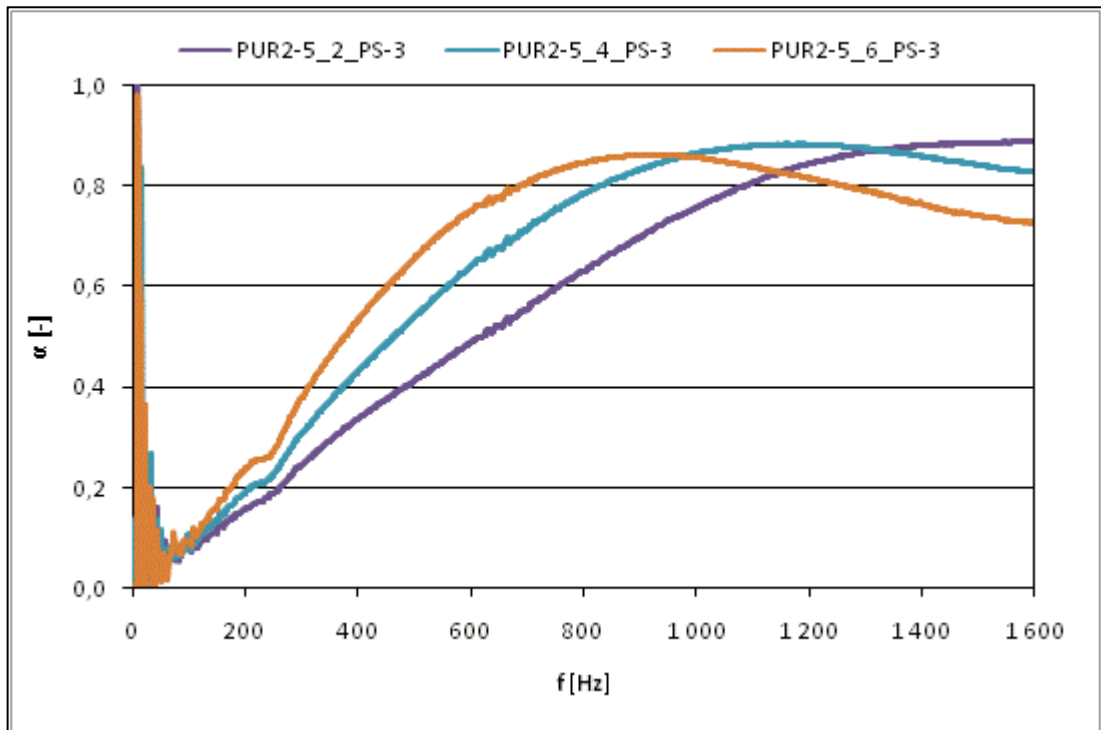
Graf 50 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací  
PUR1-1\_x\_PUR1-1



Graf 51 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PUR6-5\_x\_KOTE-1



Graf 52 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PR2-3\_x\_PET-2



Graf 53 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PUR2-5\_x\_PS-3

Tímto experimentem jsme získali velice uspokojivé výsledky, hlavně tedy u kombinace dvou různých materiálů, z nichž jedním byla PUR pěna s pěnovým PS. Tato kombinace materiálů sice v žádném frekvenčním pásmu nepohltila všechnu akustickou energii, za to však pokryla frekvence zhruba od 600 do 1600 Hz průměrně hodnotou 0,8 činitele zvukové pohltivosti.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nahlédnutí do problematiky pohlcování zvuku.

V teoretické části jsme se zabývali důvodem pohlcování nežádoucího zvuku (hluku), základními pojmy v akustice, jejími veličinami, kterým je nutné porozumět, abychom se mohli plně zaměřit na samotnou zvukovou pohltivost materiálů. Uvedli jsme si také, jakými metodami se zvuková pohltivost měří, a stručně si tyto metody popsali.

V praktické části jsme se věnovali samotnému experimentálnímu měření zvukové pohltivosti metodou přenosové funkce. Připravili jsme vzorky materiálů různých fyzikálních a mechanických vlastností a postupně graficky vyhodnocovali jejich frekvenční závislosti činitele pohlcování zvuku. Metoda přenosové funkce má tu výhodu, že není třeba vzorků o velikých rozměrech a vzhledem k principu měření se tato metoda hodí pro výzkum a návrhy zvukoizolačních vrstev. Zjistili jsme například, že tuhé látky (PET, PMMA, PP) téměř veškerou akustickou energii odrazí a že naopak se zvyšující elasticitou a porézností se zvukoizolační schopnost materiálu zvyšuje. Můžeme také jednoznačně konstatovat, že vliv tloušťky, tvaru povrchu má pozitivní dopad na absorpci zvuku. Nicméně z ekonomického hlediska je to poněkud náročnější, proto jsme hledali řešení ve vkládání vzduchových mezer za a mezi vzorky materiálu. Tím jsme pokaždé získali odlišnou frekvenční závislost činitele zvukového pohlcování. Za zmínku také stojí kombinování různých druhů materiálů, zpravidla se vyplatí kombinovat pěnové materiály s tuhými, a to z důvodu zvýšení mechanické tuhosti, při zachování nebo dokonce zvýšení účinku zvukové izolace. Zkoumali jsme kombinace dvou a tří vrstev, přičemž nejlepších výsledků jsme dosáhli při zkombinování pěny, elastomeru a tuhého polymeru. Takto sestavená sendvičová kombinace zajistí dobré vlastnosti pohlcování zvuku i mechanické tuhosti, nicméně je ekonomicky velmi náročná.

Nakonec bych velmi rád zmínil vlastnosti recyklované PUR pěny, která má prokazatelně lepší schopnost pohlcovat zvuk než PUR pěna stejné tloušťky i pórovitosti. Z ekologického hlediska je takto vyrobený materiál navíc mnohem šetrnější vůči přírodě, z toho důvodu by se na takovéto materiály mělo inženýrství v akustice, ale nejen tam, zaměřit.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Nový R.: Hluk a chvění, ČVUT v Praze, (2000)
- [2] Vaňková, M. a kol.: Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I. Skriptum VUT Brno, (1995)
- [3] Mišun V.: Vibrace a hluk, VUT v Brně, Nakladatelství PC-DIR Real, s. r. o. Brno (1998)
- [4] WWW: <http://www.tzb-info.cz/>
- [5] Wikipedia.org – sound reduction index, [online]. [cit. 2012-14-5], dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_reduction\\_index](http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_reduction_index)>
- [6] ufmi.utb.cz - Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice, [online]. [cit. 2012-12-5], dostupné z: WWW <[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_lab\\_02.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_lab_02.pdf)>
- [7] ufmi.utb.cz - Pohlcování zvuku, šíření zvuku ve volném a uzavřeném prostoru, [online]. [cit. 2012-12-5], dostupné z: WWW: <[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_04.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf)>
- [8] shop.normy.biz – Metoda poměru stojaté vlny, [online], [cit. 2012-15-5], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=54724>>
- [9] shop.normy.biz – Metoda v dozvukové komoře, [online], [cit. 2012-15-5], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=68915>>
- [10] shop.normy.biz – Metoda v přenosové funkci, [online], [cit. 2012-15-5], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=58530>>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\partial$	Úhel mezi zvukovým paprskem a měřicí plochou [°]
$\mu$	Poissonova konstanta [-]
$A_1$	Ekvivalentní plocha prázdné dozvukové místnosti [m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Ekvivalentní plocha dozvukové místnosti se vzorkem [m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Ekvivalentní plocha [m <sup>2</sup> ]
$c_B$	Rychlost šíření vlnění pro ohybové vlnění [m.s <sup>-1</sup> ]
$c_L$	Rychlost šíření vlnění pro podélné vlnění [m.s <sup>-1</sup> ]
$c_T$	Rychlost šíření vlnění pro příčné (kolmé) vlnění [m.s <sup>-1</sup> ]
E	Modul pružnosti materiálu v tahu [Pa]
E	Akustická energie [J]
f	Frekvence vlnění [Hz]
G	Modul pružnosti ve smyku [Pa]
I	Moment setrvačnosti průřezu tyče [m <sup>4</sup> ]
I	Akustická intenzita [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_1$	Intenzita zvuku odražené vlny [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_2$	Intenzita zvuku pohlcené vlny [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_3$	Celková intenzita zvuku vyzářené za stěnu [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_4$	Intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_5$	Intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_6$	Intenzita zvuku vlny, jež je vedena formou chvění, do ostatních částí přiléhajících konstrukcí [W.m <sup>-2</sup> ]
$I_7$	Intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo [W.m <sup>-2</sup> ]
K	Objemový modul pružnosti kapaliny [Pa]

$L_I$	Hladina akustické intenzity [dB]
$L_P$	Hladina akustického tlaku [dB]
$L_W$	Hladina akustického výkonu [dB]
$m_1$	Činitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovali v prostoru prázdné dozvukové komory [ $m^{-1}$ ]
$m_2$	Činitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovali v prostoru dozvukové komory se vzorkem [ $m^{-1}$ ]
$N$	Měrný akustický výkon [ $W \cdot m^2$ ]
$p$	Akustický tlak [Pa]
$P$	Akustický výkon [W]
$p_0$	Amplituda akustického tlaku [Pa]
$p_b$	Barometrický tlak [Pa]
$p_{ef}$	Efektivní hodnota akustického tlaku [Pa]
$p_{max}$	Tlakové maximum [Pa]
$p_{min}$	Tlakové minimum [Pa]
$r$	Činitel odrazu akustického tlaku [-]
$r_i$	Imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku [-]
$r_r$	Reálná složka činitele odrazu akustického tlaku [-]
$S$	Plocha [ $m^2$ ]
$T$	Perioda vlnění [s]
$T_1$	Doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti [s]
$T_2$	Doba dozvuku dozvukové místnosti bez vzorku [s]
$u$	Akustická výchylka [m]
$u_0$	Amplituda akustické výchylky
$v$	Akustická rychlost [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$v_0$	Amplituda akustické rychlosti [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

---

$v_{ef}$	Efektivní hodnota akustické rychlosti [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$w$	Hustota akustické energie [ $J \cdot m^{-3}$ ]
$Z$	Akustická impedance [ $N \cdot s \cdot m^{-3}$ ]
$\alpha$	Činitel zvukové pohltivosti [-]
$\beta$	Činitel zvukové odrazivosti [-]
$\varepsilon$	Činitel tepelné přeměny [-]
$\lambda$	Vlnová délka [m]
$\rho$	Hustota prostředí [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\tau$	Činitel zvukové průzvučnosti [-]
$\varphi$	Fázový posun [ $^{\circ}$ ]
$\omega$	Kruhová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Kmitočtové a amplitudové složení lidské řeči a hudby [4].</i>	15
<i>Obrázek 2 – Mimosluchové účinky hluku (převzato z [3]).</i>	16
<i>Obrázek 3 – Šíření zvuku od zdroje v pružném prostředí (převzato z [5]).</i>	19
<i>Obrázek 4 – Bodová řada bez deformací (převzato z [5]).</i>	22
<i>Obrázek 5 – Vývoj akustické vlny v bodové řadě (převzato z [5]).</i>	23
<i>Obrázek 6 – Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu (převzato z [5]).</i>	24
<i>Obrázek 7 – Šíření rovinné vlny na plochu S (převzato z [5]).</i>	25
<i>Obrázek 8 – Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na povrch (převzato z [7]).</i>	34
<i>Obrázek 9 - Princip měření činitele zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce. (převzato z [6]).</i>	39
<i>Obrázek 10 – PUR pěna (jemné póry)</i>	42
<i>Obrázek 11 – PUR pěna (polohrubé póry)</i>	42
<i>Obrázek 12 – PUR pěna (hrubé póry)</i>	43
<i>Obrázek 13 – PUR pěna (velmi hrubé póry)</i>	43
<i>Obrázek 14 – Recyklát PUR pěny</i>	43
<i>Obrázek 15 – PUR pěna (Tvarovaná)</i>	44
<i>Obrázek 16 – PUR pěna (jednostranně vlnitá)</i>	44
<i>Obrázek 17 – Pěnový polystyrén (PS)</i>	44
<i>Obrázek 18 – Polyetylentereftalát (PET)</i>	45
<i>Obrázek 19 – Polymetylmetakrylát (PMMA)</i>	45
<i>Obrázek 20 – Polypropylen (PP)</i>	46
<i>Obrázek 21 – Černá pryž (jemná struktura)</i>	46
<i>Obrázek 22 – Černá pryž (hrubá struktura)</i>	46
<i>Obrázek 23 – Zelená pryž</i>	47
<i>Obrázek 24 – Hnědá pryž</i>	47
<i>Obrázek 25 – Bílá pryž</i>	47
<i>Obrázek 26 – Korek s textilním povrchem</i>	48
<i>Obrázek 27 – Skelná vata</i>	48
<i>Obrázek 28 – Schéma zapojení měřící aparatury pro měření činitele zvukové.</i>	49
<i>Obrázek 29 – Sestavená měřící aparatura</i>	50
<i>Obrázek 30 – měření jednotlivých materiálů</i>	51
<i>Obrázek 31 – měření kombinace dvou vrstev</i>	51

---

*Obrázek 32 – měření kombinace tří vrstev ..... 51*  
*Obrázek 33 – měření se vzduchovou mezerou mezi dvěma vzorky ..... 51*

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 - Příklady hlukových hladin v okolí [4] .....</i>	15
<i>Tabulka 2 - Rychlosti zvuku některých plynů a tekutin [3].....</i>	20
<i>Tabulka 3 - Rychlost zvuku podélného vlnění některých pevných látek [3] .....</i>	21
<i>Tabulka 4 – Přehled vyjádření decibelových veličin užívaných v akustice .....</i>	32
<i>Tabulka 5 – Přehled zkoumaných vzorků .....</i>	41
<i>Tabulka 6 – přehled jednotlivých vzorků .....</i>	52
<i>Tabulka 7 – Přehled materiálů v dvouvrstvé kombinaci .....</i>	67
<i>Tabulka 8 – Přehled třívrstvých kombinací materiálů .....</i>	76
<i>Tabulka 9 – přehled kombinace vzorků se vzduchovou mezerou uprostřed.....</i>	80

## SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. promateriál PUR1-t_x .....</i>	53
<i>Graf 2 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR2-t_x .....</i>	54
<i>Graf 3 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR3-t_x .....</i>	54
<i>Graf 4 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR4-t_x .....</i>	54
<i>Graf 5 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR5-t_x .....</i>	55
<i>Graf 6 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PUR6-t_x .....</i>	55
<i>Graf 7 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál REC-t_x.....</i>	56
<i>Graf 8 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PS-t_x.....</i>	56
<i>Graf 9 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PET-t_x .....</i>	57
<i>Graf 10 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PMMA-t_x.....</i>	57
<i>Graf 11 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PP-t_x .....</i>	58
<i>Graf 12 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR1-t_x .....</i>	58
<i>Graf 13 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR2-t_x .....</i>	59
<i>Graf 14 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR3-t_x .....</i>	59
<i>Graf 15 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR4-t_x .....</i>	60
<i>Graf 16 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál PR5-t_x .....</i>	60
<i>Graf 17 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál TEKO-t_x ; KOTE-t_x .....</i>	61
<i>Graf 18 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. pro materiál SV-t_x.....</i>	61
<i>Graf 19 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM pro PUR1-5_x ; PMMA-2_x.....</i>	62
<i>Graf 20 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM pro REC-5_x ; PR4-2_x .....</i>	63
<i>Graf 21 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tloušťky pro PUR1-t_0 .....</i>	64
<i>Graf 22 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tloušťky pro PUR1-t_0.....</i>	64
<i>Graf 23 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pórovitosti pro PUR pěny.....</i>	65
<i>Graf 24 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu tvaru povrchu pro PUR pěny .....</i>	66
<i>Graf 25 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. – ekonomika recyklátů vzhledem k jiným druhům mat.....</i>	66
<i>Graf 26 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR1-3/REC-3_x .....</i>	68
<i>Graf 27 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3 / PUR2-3_x .....</i>	68
<i>Graf 28 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PET-2/PUR4-5_x.....</i>	69
<i>Graf 29 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR4-5_x (jeden směr).....</i>	69
<i>Graf 30 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace TEKO-1/PUR-5_x.....</i>	70

<i>Graf 31 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace KOTE-1/PUR3-5_x</i> .....	70
<i>Graf 32 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PMMA-2/PR1-2_x</i> .....	71
<i>Graf 33 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace REC-2/PP-2_x</i> .....	71
<i>Graf 34 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace (PMMA-2/PS-3_x)</i> .....	72
<i>Graf 35 – Porovnání frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR4-2_0</i> .....	73
<i>Graf 36 - Porovnání frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/PUR2-3_0</i> .....	73
<i>Graf 37 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pořadí kombinace PET-2/PUR4-5_0</i> .....	74
<i>Graf 38 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu pořadí kombinace KOTE-1/PUR3-5_0</i> .....	75
<i>Graf 39 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vlivu VM kombinace PR1-2/PMMA-2_x</i> .....	75
<i>Graf 40 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/PR3-1/PMMA-2_x</i> .....	77
<i>Graf 41 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace REC-2/PS-2/KOTE-1_x</i> .....	77
<i>Graf 42 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PR3-1/PP-2_x</i> .....	78
<i>Graf 43 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace TEK0-1/PUR3-5/PET-2_x</i> .....	78
<i>Graf 44 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PS-3/SV-5/PP-2_x</i> .....	79
<i>Graf 45 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR4-5/PR2-3/PS-3_x</i> .....	79
<i>Graf 46 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. kombinace PUR6-5/PS-3/PMMA-2_x</i> .....	80
<i>Graf 47 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PP-2_x_PP-2</i> .....	81
<i>Graf 48 - Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PR3-1_x_PR3-1</i> .....	82
<i>Graf 49 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací REC-2_x_REC-2</i> .....	82
<i>Graf 50 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací</i> .....	83
<i>Graf 51 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PUR6-5_x_KOTE-1</i> .....	83
<i>Graf 52 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PR2-3_x_PET-2</i> .....	84
<i>Graf 53 – Frekvenční charakteristiky č.z.p. vložené VM mezi kombinací PUR2-5_x_PS-3</i> .....	84



