

Akustické vlastnosti perforovaných polymerních materiálů pro zvýšení pohltivosti v nízkých frekvencích

Přemysl Fajkus

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Přemysl Fajkus
Osobní číslo: T17752
Studijní program: B2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Akustické vlastnosti perforovaných polymerních materiálů pro zvýšení pohltivosti v nízkých frekvencích

Zásady pro vypracování

1. Shromáždění teoretických základů pro zadané téma v oblasti akustiky nízkých frekvencí.
2. Výběr polymerních materiálů, návrh perforace s povrchovými úpravami, příprava samostatných vzorků a jejich kombinací pro měření akustické pohltivosti a neprůzvučnosti ve frekvenčním pásmu pod 1kHz.
3. Vyhodnocení a diskuse naměřených dat s doporučením pro technické aplikace.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Nový R., HLUK A CHVĚNÍ, 1995, ISBN 80-01-02246-3.
2. Preudhomme R.K., Khan S.A., FOAMS, 1995, ISBN 0-8247-9395-1.
3. Klempler D., Frisch K.C., HANDBOOK OF POLYMERIC FOAMS AND FOAM TECHNOLOGY, 1991, ISBN 3-446-15097-8.
4. Park S.H., ACOUSTIC PROPERTIES OF MICRO-PERFORATED PANEL ABSORBERS BACKED BY HELMHOLTS RESONATORS FOR THE IMPROVEMENT OF LOW-FREQUENCY SOUND ABSORPTION, Journal of Sound and Vibration 322, 2013, pp 4895 – 4911.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Smolka, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením akustických vlastností vybraných polymerních materiálů v oblasti nízkých frekvencí (pod 1 kHz). V teoretické části práce jsou popsány základy akustiky související s praktickou částí. V praktické části jsou popsány různé způsoby úprav materiálů a následně je vyhodnocen vliv těchto úprav na hodnoty koeficientu akustické pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti.

Klíčová slova: akustické vlastnosti, polymerní materiály, nízké frekvence, perforace, koeficient akustické pohltivosti, vzduchová neprůzvučnost.

ABSTRACT

The work deals with the measurement of acoustic properties of selected polymeric materials in the low frequency range (below 1 kHz). The theoretical part of the work describes the basics of acoustics related to the practical part. The practical part describes various methods of material modifications and then evaluates the influence of these on the values of the coefficient of acoustic absorption and airborne soundproofing.

Keywords: Acoustic Properties, Polymeric Materials, Low Frequency, Perforation, Coefficient of Acoustic absorption, Airborne Soundproofing.

Předně bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Juříčkovi, Ph.D. za spolupráci v předchozích letech, která dala podněty vedoucí k vytvoření této bakalářské práce a za neocenitelnou pomoc při realizaci měření týkající se této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Smolkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost při tvorbě této bakalářské práce.

Velké díky patří rodičům, díky kterým mám možnost studovat a bez nichž by tato práce nikdy nevznikla. Stejně tak rodině a přátelům, kteří mě podporovali v průběhu let.

„Uvažte, jak je těžké změnit sám sebe, a pochopíte, jak malou šanci máte, snažíte-li se měnit druhé.“ – Benjamin Franklin

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

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 TEORETICKÝ ZÁKLAD	10
1.1 HLUK A ZVUK OBECNĚ, ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE.....	10
1.1.1 Frekvence	11
1.1.2 Vlnová délka	11
1.1.3 Koeficient akustické pohltivosti.....	12
1.1.4 Vzduchová neprůzvučnost	14
1.1.5 Hladina akustického tlaku	16
1.2 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ HLUKU	16
1.3 TLUMÍCÍ MATERIÁLY	17
1.4 POLYMERNÍ MATERIÁLY OBECNĚ	18
1.4.1 Polyuretany	19
1.4.2 Polyethylen.....	20
1.4.3 Polyestery	20
1.5 PERFORACE	21
1.5.1 Akustický efekt perforace a geometrie	21
II PRAKTICKÁ ČÁST	22
2 POSTUP A METODIKA MĚŘENÍ	23
2.1 VYBRANÉ MATERIÁLY PRO MĚŘENÍ.....	23
2.1.1 Rozdělení materiálů a jejich vlastnosti	24
2.2 METODY MĚŘENÍ.....	24
2.2.1 Příprava vzorků	24
2.2.2 Měřicí zařízení - koeficient zvukové pohltivosti.....	25
2.2.3 Měřicí zařízení - vzduchová neprůzvučnost	27
3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	29
3.2 AKUSTICKÁ POHLTIVOST.....	33
3.3 VZDUCHOVÁ NEPRŮZVUČNOST	38
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	46
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	49

ÚVOD

V dnešní době jsme obklopeni hlukem. Jeho zdrojem jsou věci, které považujeme za běžnou součást našeho života, jako jsou třeba automobily, spotřebiče, letadla, strojní zařízení a další. Při dlouhodobé expozici však může mít neblahé následky na naše zdraví. Z tohoto důvodu se snažíme zamezit vystavování se hluku. [16, 17]

Každý hluk je charakterizován intenzitou a frekvencí. K jeho tlumení jsou v současnosti hojně využívány polymerní materiály, jako jsou pěnové polyuretany, polyestery a další. Při měřeních se však lze setkat s tím, že vlny o nízkých frekvencích se hůře tlumí než vlny o vyšších frekvencích. Toto je dáno z vlastností vlny. Jako hranici nízkých frekvencí lze označit 1 kHz. Zlom u mnoha materiálů/sendvičů nastává kolem frekvence 500 Hz. Pod touto hranicí nastává propad koeficientu akustické pohltivosti, což je velmi nepříznivé pro aplikace, kde je vyžadováno tlumení nízkofrekvenčních vln. Tento úbytek lze kompenzovat zvýšením tloušťky materiálu, které nám však značně omezí možnosti aplikace ať už z rozměrových či váhových omezení. Další možností je zvýšení plochy perforací, tedy odebráním materiálu za zvýšením plochy a případné změny úhlu plochy, na kterou vlna dopadá. Cílem této bakalářské práce je zhodnotit vliv perforace vybraných polymerních materiálů použitých v oblasti nízkých frekvencí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

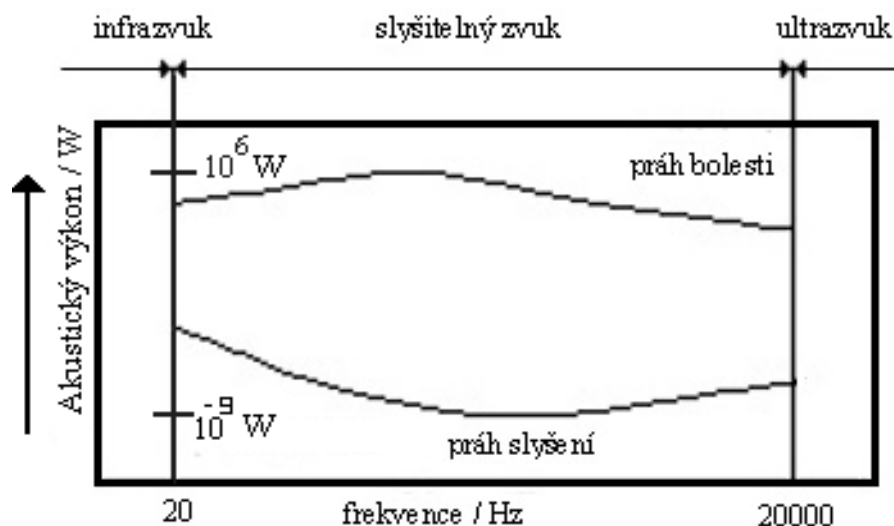
1 TEORETICKÝ ZÁKLAD

1.1 Hluk a zvuk obecně, základní pojmy a definice

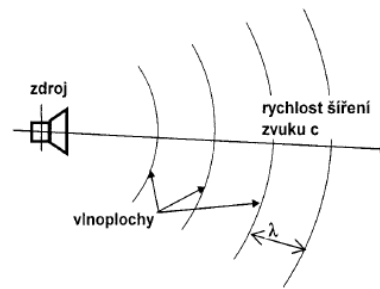
Hlukem můžeme označit jakýkoliv nežádoucí, nám nepříjemný zvuk. Jinak nelze hluk přesněji definovat. Vnímání, zda jde o hluk, nebo ne, je velmi subjektivní. Záleží totiž na vztahu člověka k danému zvuku. Parametrem definujícím vliv hluku na člověka je jeho intenzita [1].

Od 65dB výše se již začínají nepříznivě projevovat účinky hluku zejména změnami vegetativních funkcí (funkcí udržujících organismus při životě). Při trvalé expozici člověka hluku, kde jeho hladiny akustického tlaku přesahují 85 dB, již vznikají trvalé poruchy sluchu. Současně se ve větší míře projevují účinky na vegetativní systém a celou nervovou soustavu. Při 130 dB se obvykle účinky hluku mění na bolest ve sluchovém orgánu. K protržení bubínku dochází při hladinách kolem 160 dB [1].

Slyšitelným zvukem se rozumí mechanické kmitání v rozsahu 20 až 20 000 Hz. Obecně definujeme tři pásma zvuku: infrazvuk (0 až 20 Hz), slyšitelné pásmo (20 až 20 000 Hz) a ultrazvuk (nad 20 000 Hz) [1].



Obrázek 1: Intenzitní a frekvenční pásmo ve slyšitelné oblasti [1]



Obrázek 2: Šíření zvuku po vlnoplochách od zdroje [1]

Na obrázku 2 můžeme vidět šíření akustického vlnění ve vlnoplochách. Vlnoplochu v akustice definujeme jako geometrické místo bodů, které kmitají v daném čase stejnou fází.

1.1.1 Frekvence

Frekvence f (Hz) - určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu T a frekvencí f tedy platí vztah [1]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

kde f je frekvence (Hz), T je perioda (s)

Podobně je možné přepočítat úhlový kmitočet ω v Hz dle vzorce [1]:

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

kde ω je úhlový kmitočet (s^{-1}), f je frekvence (Hz)

1.1.2 Vlnová délka

Je vzdálenost dvou po sobě časově následujících bodů kmitajících ve fázi. Obecně je to vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic. Lze ji také definovat jako vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periodu. Platí vztah [1]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

kde λ je vlnová délka (m), f je frekvence daného vlnění (Hz), c je rychlost zvuku v daném prostředí (m/s)

1.1.3 Koeficient akustické pohltivosti

Jestliže akustická vlna dopadne na povrch jakéhokoliv média, pak se část energie vlnění přeměňuje na jiný druh energie (nejčastěji tepelnou a také dané médium rozkmitá) a zbytek akustické energie se od média odrazí. Koeficient akustické pohltivosti α (nebo také akustická pohltivost) je definován jako poměr akustické energie absorbované povrchem k energii dopadající na povrch podle vztahu [1]:

$$\alpha = \frac{E_{\text{Absorbovaná}}}{E_{\text{Dopadající}}} = 1 - |R^2| \quad (4)$$

kde R je součinitel odrazu (-) a je definován jako podíl akustických tlaků odražené a dopadající akustické vlny.

Koeficient akustické pohltivosti α nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž $\alpha = 0$ odpovídá nulové pohltivosti (dojde k úplnému odrazu energie). V případě, že je $\alpha = 1$, tak se veškerá energie dopadající na povrch pohlcuje do struktury [1].

Koeficient akustické pohltivosti závisí na struktuře konkrétního materiálu. V případě hladkých a tvrdých materiálů dosahuje koeficient akustické pohltivosti nízkých hodnot. Jejich obvyklé maximum se pohybuje kolem $\alpha = 0,1$. Druhým extrémem jsou porézní měkké materiály s pružnou strukturou. Jedná se většinou o panely z netkaných textilií, skelných vat, nebo pěnové materiály. Jejich maximum koeficientu akustické pohltivosti může dosahovat až $\alpha = 1$. Výsledná pohltivost je závislá na tloušťce daného materiálu, jeho struktuře a frekvenci daného vlnění na něj dopadajícího [1].

Koeficient akustické pohltivosti lze pak vyhodnotit takto [1]:

$\alpha = 0,4 - 0,6$ dostačující akustická pohltivost

$\alpha = 0,6 - 0,8$; dobrá akustická pohltivost

$\alpha = 0,8 - 1$; velmi dobrá akustická pohltivost

Z hlediska praxe je potom nutné věnovat pozornost tloušťce daného materiálu. V mnohých aplikacích bývá jasně stanovená maximální tloušťka tlumících vrstev z důvodů konstrukce například v leteckém průmyslu. [1, 6]

Aby bylo možné důkladněji sledovat vlastnosti pohltivých látek, zavádí se další veličiny, pomocí kterých tyto vlastnosti definujeme. Co se děje s akustickou energií při dopadu na určitou překážku názorně ukazuje schéma na Obrázku 3. Akustický výkon dopadající na 1m^2 stěny, označený jako intenzita zvuku I_0 se rozdělí na části [1]:

I_1 – intenzita zvuku vlny odražené,

I_2 – intenzita zvuku vlny pohlcené,

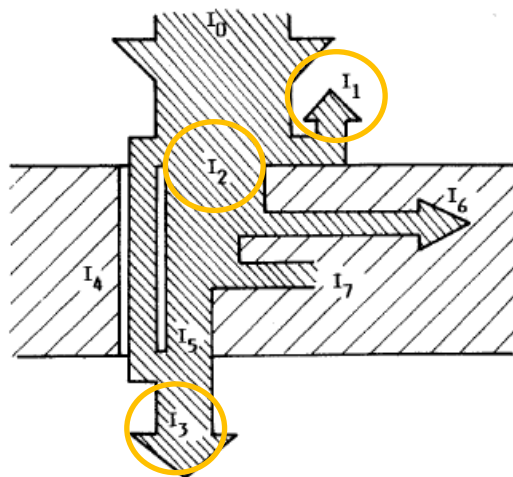
I_3 – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,

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, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,

I_7 – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.



Obrázek 3: Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu [1], v kolečku označené hodnoty jsou v praxi nejpoužívanější

Dle obrázku 3 je schopnost materiálu pohlcovat zvuk, tedy výše zmíněný koeficient akustické pohltivosti α , definována poměrem energie I_2 , pohlcené určitou plochou, a energii I_0 , která na tuto plochu dopadá. Dle této definice je pak α dán vztahem [1]:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (5)$$

Podobným způsobem můžeme definovat koeficient zvukové odrazivosti β [1]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (6)$$

a koeficient průzvučnosti τ [1]:

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0} \quad (7)$$

Toto rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky vyhovuje v oblasti prostorové akustiky. Při navrhování zvukoizolačních konstrukcí je však třeba znát podíl akustické energie, které se přeměňují ve stěně na teplo. Zavádí se proto další veličina, která vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající, koeficient přeměny ε [1]:

$$\varepsilon = \frac{I_7}{I_0} \quad (8)$$

V obr. 3 je vyznačená hodnota I_6 , v případě zvukoizolačních krytů, jejichž stěny jsou z ocelového plechu, prakticky rovna nule. Potom můžeme na základě platnosti zákona zachování energie psát vztah [1]:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (9)$$

Z porovnání uvedených vztahů dále vyplývá, že [1]:

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (10)$$

1.1.4 Vzduchová neprůzvučnost

Neprůzvučností jakéhokoliv dělicího prvku je míněná schopnost stěny nepropouštět na její druhou stranu akustické vlnění. V technické praxi se rozeznávají dva druhy neprůzvučnosti [1]: a) vzduchová b) kročejová.

Množství, respektive podíl akustického výkonu, který se dostává za stěnu, se udává v decibelech. Akustická kvalita stěny se tedy popisuje vzduchovou neprůzvučností R (dB). Vzduchová neprůzvučnost je dána vztahem [1]:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (11)$$

Vzduchová neprůzvučnost je frekvenčně závislá. Je tedy nutno uvádět její spektrum. V praxi v důsledku neprůzvučnosti stěn bývá snížena hladina o 10 až 50 dB [1].

Známe-li hladiny akustického tlaku ve dvou sousedních místnostech, kde L_{p1} je hodnota naměřená v dozvukovém poli hlučné místnosti (se zdrojem hluku) a L_{p2} je hladina akustického tlaku v přijímací místnosti ve vzdálenosti rovné $\frac{1}{2}$ šířky stěny, bude jejich rozdíl dán rovnicí [1]:

$$L_{p1} - L_{p2} = R + 10 \log \frac{A_2}{S} \quad (11)$$

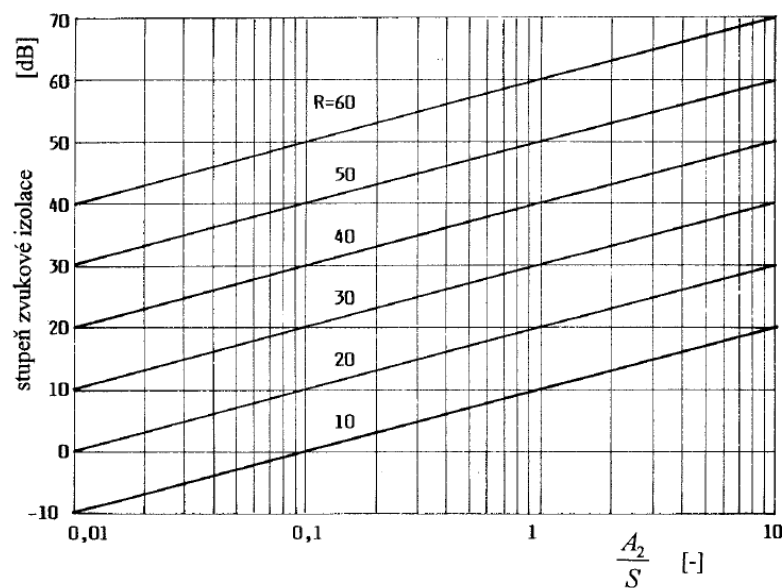
kde R je vzduchová neprůzvučnost (dB), S je plocha dělicí stěny (m^2), A_2 celková pohltivost přijímacího prostoru (m^2) [1].

$$A_2 = \Sigma(\alpha_i S_i)_2 \quad (12)$$

Levá strana rovnice (11) se označuje jako stupeň zvukové izolace D , která udává výsledný zvukoizolační efekt (dB) [1]:

$$D = L_{p1} - L_{p2} \quad (13)$$

Jestliže je vzduchová neprůzvučnost vlastností stěny, tak stupeň zvukové izolace D závisí na vzduchové neprůzvučnosti R , ale také na rozměru stěny a celkové pohltivosti přijímacího prostoru. Z tohoto důvodu je nutno hodnotit hlukovou situaci nejen podle vzduchové neprůzvučnosti [1].



Obrázek 4: Stupeň zvukové izolace jako funkce vzduchové neprůzvučnosti, pohltivosti prostoru a rozměru dělicí stěny [1].

1.1.5 Hladina akustického tlaku

Jedna z nejdůležitějších akustických veličin, která je definována vztahem [1]:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (14)$$

kde p je efektivní hodnota akustického tlaku, p_0 je referenční hodnota akustického tlaku a rovná se $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Akustický tlak, resp. hladina akustického tlaku je nejsnáze měřitelnou veličinou. Proto se jejího měření užívá i v případech, kdy akustické vlny nejsou postupné a rovinné. Stupnice akustického tlaku má nulovou hodnotu při akustickém tlaku p tak malém, že je roven referenční hodnotě p_0 . Každé desetinásobné zvýšení akustického tlaku se projevuje odpovídajícím zvýšením hladiny akustického tlaku o 20 dB [1].

1.2 Způsoby snižování hluku

Při snižování hluku strojních zařízení postupujeme podle dvou základních způsobů [1]:

- Primární způsob – konstrukční řešení stroje, nebo strojních zařízení za účelem snížení vyzařovaného akustického výkonu.
- Sekundární způsob – zde dochází k útlumu nebo úplnému pohlcení akustické energie vyzářené zdrojem pomocí konstrukčních prvků k tomu určených.

Pro realizaci sekundárního způsobu se hojně využívají tzv. tlumící materiály [1].

1.3 Tlumící materiály

Tlumící materiály mohou být obecně děleny podle účelu na dvě skupiny: Účel první skupiny je poskytnout co nejvyšší pohltivost (především v uzavřených místnostech) bez ohledu na to, zda se bude zvuk šířit do dalších prostor. Není tedy kladen důraz na to, aby se co nejvíce hluku přeměnilo na tepelnou energii. Účel druhé skupiny je izolovat zvuk, tedy aby se co nejvíce zvuku pohltilo a zároveň utlumilo přeměnou na tepelnou energii. V mnoha případech lze materiály využít k oběma účelům [1, 2].

Tlumící materiály se vyznačují těmito vlastnostmi [1, 2]:

- a) vysoká pohltivost zvuku
- b) dostačující zvuková neprůzvučnost
- c) vyšším koeficientem přeměny ε (vnitřním útlumem)

Pohlcování zvuku je jev, jehož podstatou je přeměna zvukové energie na jiný druh energie, nejčastěji na tepelnou energii. Tato přeměna může proběhnout těmito způsoby [1]:

- a) Třením molekul vzduchu při proudění póry pohltivého materiálu. Ke značně velké přeměně kinetické energie v tepelnou dochází především u materiálů s vysokou porozitou a z toho plynoucí i velkou styčnou plochou mezi pohybujícími se molekulami vzduchu a materiálem.
- b) Snižováním potenciální energie zvukové vlny vnikající do pohltivého materiálu, čímž dochází ke snížení akustického tlaku. Snížení tlaku může být způsobeno výměnou tepla mezi vzduchem a skeletem pohltivého materiálu při periodických tlakových změnách.
- c) Nepružnou deformací tělesa, na které dopadá zvuková vlna. Energie potřebná k jeho deformaci je vlivem nepružné deformace vyšší než energie, která se následně ze stěny vyzáří. Rozdíl představuje energii pohlcenou.

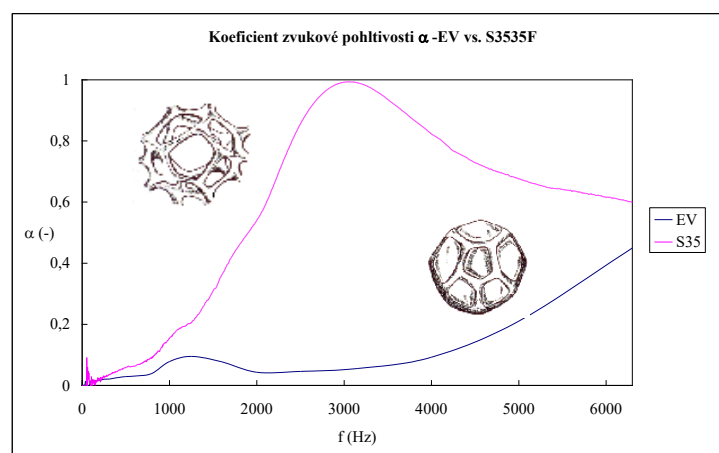
Reálně dochází ke ztrátě zvukové energie kombinací všech tří výše uvedených způsobů. Může dojít k situaci, kde jeden způsob bude výrazně převažovat nad ostatními.

1.4 Polymerní materiály obecně

Jedná se o z větší části organické látky přírodního nebo syntetického původu. Jeden z nejznámějších zástupců je přírodní kaučuk. Jako polymer anorganického původu lze uvést silikony. Typickým znakem polymerů jsou velké molekuly tzv. makromolekuly. V makromolekulách se opakuje základní konstituční jednotka tzv. „mer“. Délku makromolekul lze vyjádřit v molární hmotnosti. Jako makromolekulární můžeme označit takovou látku, jejíž molární hmotnost je větší než 10^3 g/mol. V případě polymerů přesahuje molární hmotnost i 10^4 g/mol [3].

Pro přípravu syntetických polymerů se využívají monomery. Jde o nízkomolekulární látky, které jsou převážně organického původu a jsou získávány především z ropy a ropných produktů vznikajících při jejím zpracování. Monomery mohou třemi různými poly-reakcemi (polymerace, polyadice, polykondenzace) vytvořit výsledný polymer [3].

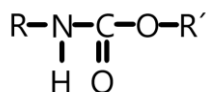
Polymery mohou obsahovat dvě dominantní formy pórů podle chemického složení, a to buď buňky otevřené nebo uzavřené. Toto má základní vliv na konečné vlastnosti a použití polymeru. V porovnání s uzavřenými póry mají otevřené póry vyšší absorpční schopnost pro vodu, vlhkost, větší propustnost plynů a par, nižší izolační schopnost tepla ale vyšší schopnost pohlcovat a tlumit zvuk. Závislost akustického koeficientu pohltivosti na frekvenci pro materiály s otevřenými a uzavřenými póry je názorně zobrazen v obrázku 5. Podstatou akustické pohltivosti materiálů s otevřenými póry je schopnost struktury pohlcovat akustickou energii zvukové vlny přes jednotlivé póry a spojitě blány, které vznikají při vlastním vzniku polymeru [2, 3, 4].



Obrázek 5: Závislost akustického koeficientu pohltivosti na frekvenci pro pění s uzavřenými póry („EV“) a otevřenými póry („S3535F“), křivky reprezentují rozdíl mezi vlastní strukturou pórů a jejich vlivu na pohltivost [6]

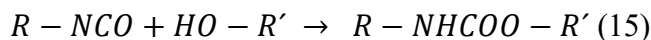
1.4.1 Polyuretany

Polyuretan poprvé syntetizoval Otto Bayer v roce 1937 reakcí polyesterdiolu a diisokyanátu. Polyuretany je označení polymerů obsahujících uretanovou vazbu v řetězci viz obrázek 6. V roce 1954 započala výroba měkkých pěn. Od roku 1960 byly polyuretany stále více používány v automobilovém průmyslu jak na bezpečnostní prvky, tak na interiér. Od roku 1967 došlo k rozvoji fluorovaných nadouvadec (freonů). Od těch se však s jejich omezováním ustoupilo a freony nahradila voda jako nadouvadlo. Polyuretany se řadí mezi reaktoplasty, tedy polymery, které přechází nevratnou chemickou reakcí z lineárního viskózního stavu do síťovaného. Tímto přechodem se materiál stává netavitelný a nerozpustný. Mohou však být i nezesíťované semikrystalické (lineární polyuretany) termoplasty [3, 4, 5, 7].

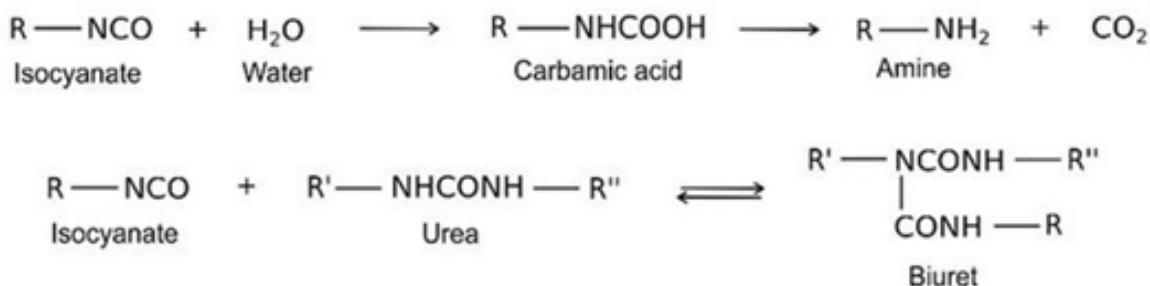


Obrázek 6 :Polyuretanová vazba

Polyuretany vznikají polyadicí vícefunkčních izokyanátů s polyalkoholy [3,5,7]:



Při reakci s vodou dojde k zesíťování, vzniku disubstituované močoviny, která další reakcí s izokyanátem vytvoří biuretovou strukturu. Zároveň dochází k vypěnění pomocí vznikajícího CO_2 . [3,5,7]

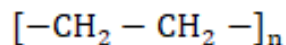


Obrázek 7: Reakce s vodou jako nadouvadlem [8]

Vlastnosti se liší od typu výrobků, obecně však lze říci že: polyuretany mají obecně dobrou odolnost vůči otěru a odolnost proti nárazům. Mají stabilní vlastnosti s minimálním bobtnáním ve vodě a oleji. Vykazují také dobré elektricky izolační vlastnosti [2, 3, 7].

1.4.2 Polyethylen

Semikrystalický termoplast, jehož vlastnosti jsou dány jeho molekulovou strukturou: tvarem a délkou makromolekul, prostorovým uspořádáním a stupněm krystalinity [3, 7].



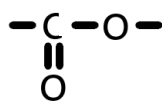
Obrázek 8: Strukturní vzorec polyethylenu

Podle způsobu výroby je možno získat mnoho typů PE: Nízko-hustotní PE (PE-LD), lineární nízko-hustotní PE (PE-LLD), vysoko-hustotní PE (PE-HD), s ultra vysokou molární hmotností (PE-UHMW), sesítovaný PE (XPE/PE-X) a další. Monomerem pro PE je ethen, pro jeho získávání se využívají produkty ze zpracování ropy, nebo vedlejší uhlovodíkové produkty průmyslové výroby. [3, 7]

Obecně je polyethylen nepolární a nelepitelný termoplast. Za běžných podmínek má vysokou chemickou odolnost a dobré elektroizolační vlastnosti. [3, 7]

1.4.3 Polyestery

Jsou to buď lineární a termoplastické, nebo rozvětvené a reaktoplastické polymery obsahující esterové vazby v hlavním řetězci. Výroba probíhá polykondenzací vícefunkčních monomerů [3, 7].



Obrázek 9: Esterová vazba

Obecně mají vysokou odolnost vůči povětrnostním vlivům, mikroorganizmům a malou navlhavost [3,7].

1.5 Perforace

Perforací se obecně míní odebrání části materiálu za účelem zvětšení plochy, nebo vytvoření geometrického profilu. V některých případech se může taktéž jednat o propichování uzavřených struktur s cílem vytvořit otevřenou strukturu. [9, 10, 11] Sekundárním efektem perforace je snížení hmotnosti tlumícího materiálu.

1.5.1 Akustický efekt perforace a geometrie

Perforací se dosahuje zvětšení plochy, o kterou se může vlna „otřít“ a přeměnit část své mechanické energie na energii jinou, nejčastěji tepelnou. Změnou geometrie povrchu například vytvořením jehlanů se vytváří zvětšené plochy pro možnost dopadu vln pod jiným úhlem, což přispívá ke zvýšení koeficientu akustické pohltivosti α . Pokud je však materiál příliš „děrován a odlehčen“ perforací, dochází k návratu na původní nebo nižší hodnotu koeficientu akustické pohltivosti. Tento jev je různý pro materiály v závislosti na jejich hustotě a tvrdosti [9, 10, 11].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 POSTUP A METODIKA MĚŘENÍ

2.1 Vybrané materiály pro měření

Pěny s otevřenými póry – Obecně známé pro své dobré vlastnosti při pohlcování zvuku [2].



Obrázek 10: Vzorek pěny s otevřenými póry

Pěny s uzavřenými póry – Používané hojně jako tepelné izolanty [2].



Obrázek 11: Vzorek pěny s uzavřenými póry

Vláknové netkané textilie – Tento druh materiálu byl vybrán z důvodů, že tyto materiály jsou obecně dobrými kandidáty pro použití pro pohlcování hluku díky svému celkovému povrchu a porozitě. [11]



Obrázek 12: Vzorek vláknové netkané textilie

2.1.1 Rozdělení materiálů a jejich vlastnosti

Tabulka 1: Popis použitých materiálů dle materiálových listů [12, 13, 14]

Značení použitých materiálů (pracovní značení)	Popis
MP15FR (WULFMEYER)	Zesíťovaná polyethylenová (LDPE) pěna, uzavřené póry, max. hustota 18 kg.m ⁻³ , nízká propustnost plynů, nízká absorpce vody, dobré tepelně izolační vlastnosti, vysoká cena. Využívá se v letectví.
CELLO F700 FR HO (F700)	Bílá, samozhášivá, polyesterová netkaná textilie. Hustota 20 kg.m ⁻³ ± 10 %. Tepelná vodivost ≤ 0,036W/(m K). Hodnota NRC pro tloušťku 30 mm: 0,60. Využívá se jako tlumící pěna
CMHR 3532 (molitan 1/2)	Žlutá nehořlavá polyuretanová pěna. Hustota 35 kg.m ⁻³ . Struktura s otevřenými póry. Využívá se k výrobě čalouněného nábytku, matrací a v akustice.

2.1.2 Úprava perforací

Pěna MP15FR (Wulfmeyer) byla perforovaná pomocí ručního děrovače materiálu viz obrázek 22. Průběh perforace je vyznačen na vzorku na obrázku 21. Pěna CMHR 3532 (molitan 2) byla upravena pomocí odebrání materiálu za vzniku drážek v materiálu viz obrázek 13. Netkaná textilie F700 nebyla perforována. Důvodem pro její neperforování byly předchozí negativní zkušenosti s jejími akustickými vlastnostmi po perforaci.



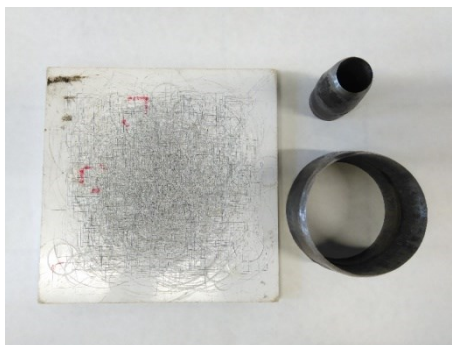
Obrázek 13: Vzor perforace pro vzorek s označením „Molitan 2“

2.2 Metody měření

2.2.1 Příprava vzorků

Pro měření se připravují dva průměry vzorků: 100 a 30 mm. Na vzorku o průměru 100 mm se měří frekvence 20 až 1600 Hz a na vzorku o průměru 30 mm se měří frekvence 800 až 6400 Hz. Nutnost použít dva vzorky vychází z vlastnosti zvukových vln. V přechodové oblasti 800-1600 Hz se provede v programu Pulse Lab kombinace výsledků z obou měření

vzorků a získá se tím graf závislosti koeficientu akustické pohltivosti α na frekvenci v rozsahu 20 až 6400 Hz. Z tohoto grafu se následně vyhodnotí použitelnost zvoleného materiálu nebo sendviče složeného z různých materiálů pro zvýšení pohltivosti. Kromě již zmíněných vlastností byla sledována i použitelnost materiálů/vzorků na potřebné frekvenci v závislosti na tloušťce materiálu/sendviče.



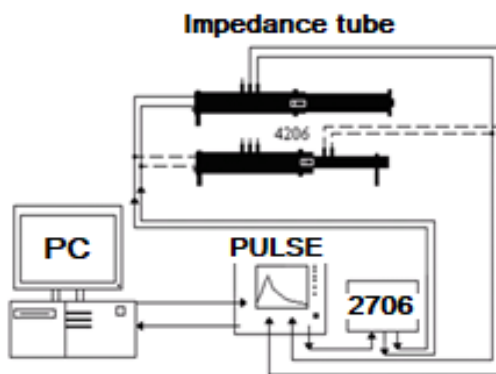
Obrázek 14: Vysekávací nože a podložná deska pro vysekávání vzorků



Obrázek 15: Hydraulický vysekávací stroj ZPS 06102 P1 pro vysekávání vzorků dle tvarových nožů 100 a 30 mm [15]

2.2.2 Měřicí zařízení - koeficient zvukové pohltivosti

Zkušební vzorky o výše uvedených průměrech byly testovány metodou Měření zvukové pohltivosti v impedanční trubici typ Bruel and Kjaer podle norem ISO 10534-2, ASTM E1050-12 a ASTM E2611-17. Základní měřicí aparatura byla sestavena dle níže uvedeného obrázku 16:



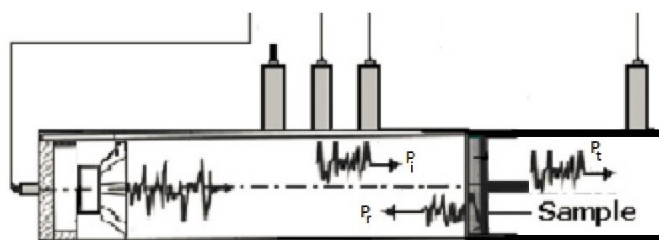
Obrázek 16: Schéma celkové měřicí aparatury

Součásti aparatury:

1. Vícekanálové zařízení multi - analyátor PULSE BK 3560-B-030
2. Mikrofony BK – typ 4187
3. Zesilovač/generátor BK Power amplifier type 2706
4. Impedanční trubice BK Impedance tube KIT 4206
5. PC Toshiba pro vyhodnocení křivek softwarem Pulse LabShop

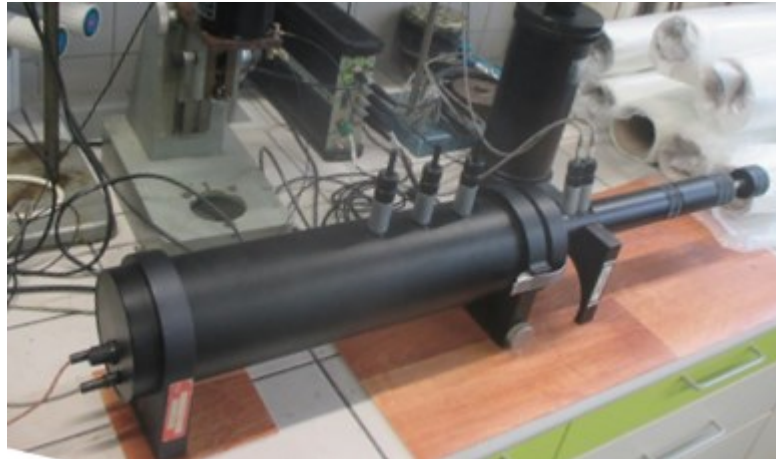
Na obrázku 17 je zobrazeno umístění vzorku v Impedanční trubici při měření. Toto umístění vzorků bylo realizováno ve dvou provedeních:

1. Bez vzduchové mezery (0 mm mezi pístem a vzorkem)
2. Se vzduchovou mezerou (10, 20 a 30 mm vzduchová mezera mezi vzorkem a pístem, v literatuře také nazývána „air cavity“)



Obrázek 17: Řez impedanční trubici s měřeným vzorkem

Reálné měřící zařízení bylo umístěno na polymerních podložkách pro eliminaci vibrací a vnějších vlivů stolu, které by mohly ovlivnit měření (především otřesy, viz. obrázek 18, zde je zobrazena modifikace impedanční trubice pro vyšší frekvence a to 800 – 6400 Hz a pro vzorky o průměru 30 mm).



Obrázek 18: Reálná aparatura pro měření koeficientu akustické pohltivosti (konfigurace pro měření vyšších frekvencí) – na obrázku je zachycena malá trubice

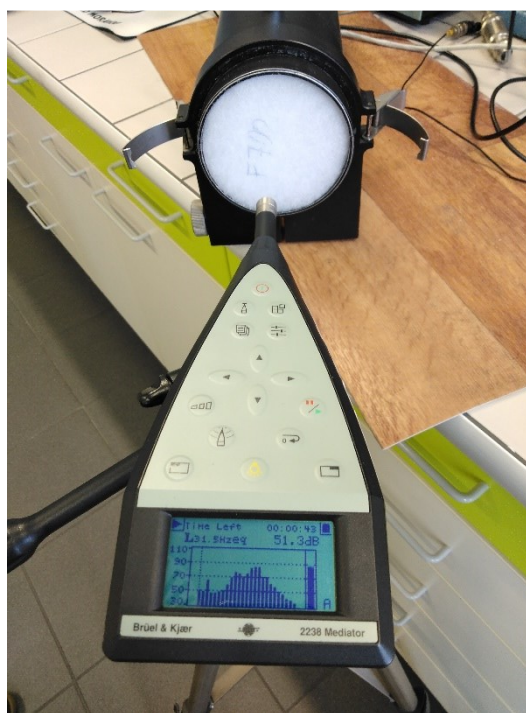
U akustické pohltivosti se často zavádí „Noise Reduction Coefficient“ zkráceně NRC. Tento koeficient vyjadřuje průměr hodnot koeficientu akustické pohltivosti α na frekvenci 250, 500, 1000 a 2000 Hz. Udává, jaká je průměrná pohltivost daného materiálu/sendviče na rozsahu nízkých až středních frekvencí.

2.2.3 Měřící zařízení - vzduchová neprůzvučnost

Pro měření bylo využito vzorků, které byly vyrobeny pro měření koeficientu zvukové pohltivosti. Zejména se pak jednalo o velké vzorky, které měly průměr 100 mm. Provedené kombinace materiálů, které byly zkoušeny na vzduchovou neprůzvučnost byly umístěny v impedanční trubici a dvojici mikrofonů, které se standardně používají pro měření akustické pohltivosti byly „alternativně“ nahrazeny mikrofonem z hlukoměru Mediator 2239 od firmy Bruel and Kjaer (Dánsko).



Obrázek 19: Aparatura pro měření vzduchové neprůzvučnosti



Obrázek 20: Měření sendviče na vzduchovou neprůzvučnost

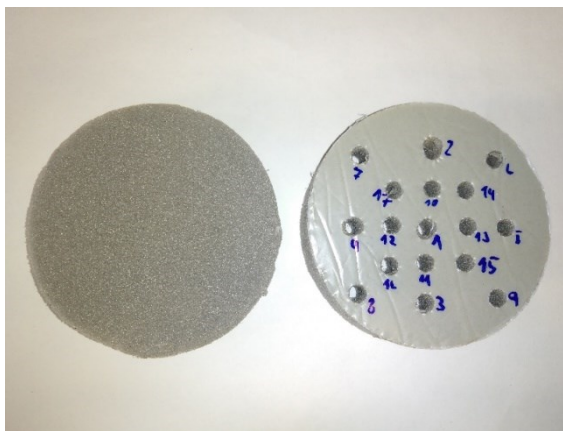
3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Následující kapitoly vyjadřují technický popis použitých materiálů a akustické veličiny. Jedná se především o následující:

- Koeficient zvukové pohltivosti (akustická veličina)
- NRC koeficient (akustická veličina)
- Vzduchová neprůzvučnost (akustická veličina)

3.1 Charakterizace měřených vzorků

WULFMEYER – U této pěny byla provedena ruční perforace děrováním pomocí děrovače kůže o průměru 5 mm. Ve vzorku pro měření v nízkých frekvencích (průměr 100 mm) bylo vyraženo celkem 17 děr. První otvor byl vyražen do středu vzorku, další v rozích pomyslného čtverce se středem v prvním otvoru. U vzorku pro měření při vysokých frekvencích (průměr 30 mm) vzorku byla vyražená pouze jedna díra uprostřed.



Obrázek 21: Pěna Wulfmeyer (100 mm) neperforovaná verze vlevo, vpravo perforovaná verze se značeným postupem perforace



Obrázek 22: Ruční děrovač materiálů

Tabulka 2: Změna hmotnosti 100 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci

Počet děr:	Hmotnost měřeného vzorku [g]	Kumulativní úbytek hmotnosti [g]
0	3,6684	0,0000
1	3,6540	0,0144
2	3,6410	0,0274
3	3,6239	0,0445
4	3,6098	0,0586
5	3,5938	0,0746
6	3,5777	0,0907
7	3,5620	0,1064
8	3,5475	0,1209
9	3,5322	0,1362
10	3,5182	0,1502
11	3,5021	0,1663
12	3,4887	0,1797
13	3,4767	0,1917
14	3,4625	0,2059
15	3,4472	0,2212
16	3,4327	0,2357
17	3,4154	0,2530

Tabulka 3: Změna hmotnosti 30 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci

Počet děr:	Hmotnost: [g]	Kumulativní úbytek hmotnosti: [g]
0	0,3135	0,0000
1	0,3070	0,0065

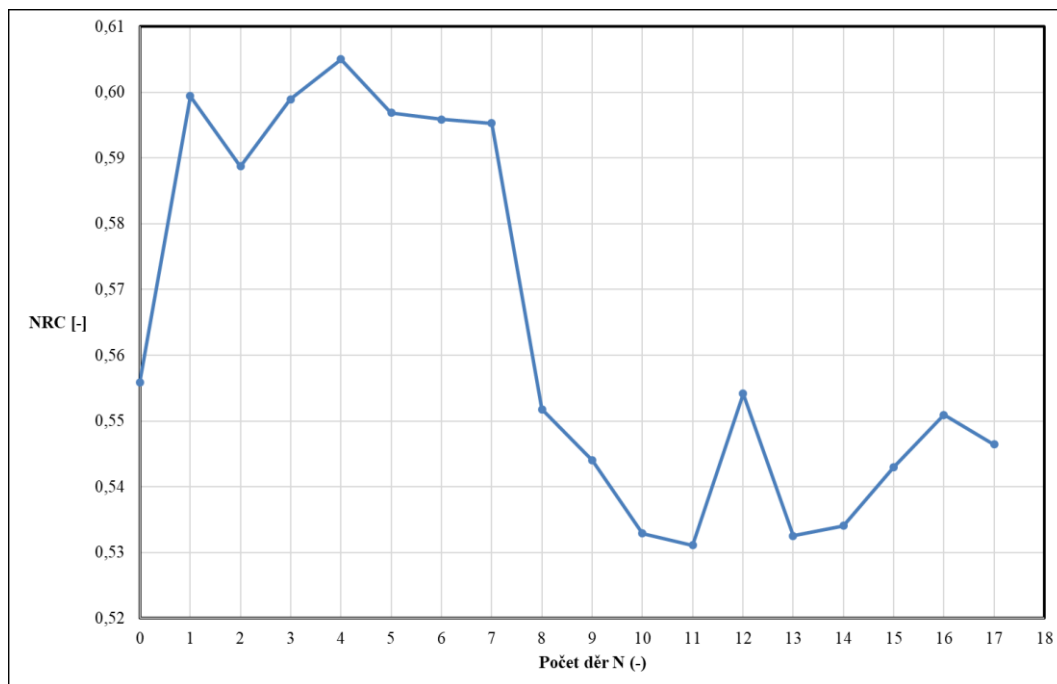
Pro vzorky, které byly měřeny na malé impedanční trubici, nebylo možné vyseknout stejný počet otvorů do vzorku jako při měření vzorků s průměrem 100mm. Tento postup byl alternativně upraven pouze na 1 otvor, který reprezentuje úbytek hmotnosti 0,0065g. Celkově se jedná o % úbytek = 2,07. Vzhledem k tomu, že bylo snahou analyzovat především nízké frekvence, tak je změna hmotnosti u vzorku s 30 mm bezvýznamná.

Tabulka 4: Změna plochy 100 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci

Počet děr	Odebraná plocha [m ²]	Změna plochy [m ²]	Úbytek plochy jednotlivých děr [m ²]	Přírůstek plochy po vyseknutí uvnitř vzorku [m ²]
0	0,0000	0,0314	0,0000	0,0000
1	0,0001	0,0313	0,0001	0,0005
2	0,0002	0,0312	0,0001	0,0009
3	0,0002	0,0312	0,0001	0,0014
4	0,0003	0,0311	0,0001	0,0019
5	0,0004	0,0310	0,0001	0,0024
6	0,0005	0,0309	0,0001	0,0028
7	0,0005	0,0309	0,0001	0,0033
8	0,0006	0,0308	0,0001	0,0038
9	0,0007	0,0307	0,0001	0,0042
10	0,0008	0,0306	0,0001	0,0047
11	0,0009	0,0305	0,0001	0,0052
12	0,0009	0,0305	0,0001	0,0057
13	0,0010	0,0304	0,0001	0,0061
14	0,0011	0,0303	0,0001	0,0066
15	0,0012	0,0302	0,0001	0,0071
16	0,0013	0,0301	0,0001	0,0075
17	0,0013	0,0301	0,0001	0,0080

Tabulka 5: Změna „Noise reduction coefficient“ (NRC) při postupné perforaci

Počet děr	NRC [-]
0	0,5559
1	0,5994
2	0,5887
3	0,5990
4	0,6050
5	0,5969
6	0,5959
7	0,5953
8	0,5518
9	0,5440
10	0,5329
11	0,5311
12	0,5541
13	0,5325
14	0,5340
15	0,5430
16	0,5509
17	0,5465



Obrázek 23: Změna NRC (Noise reduction coefficient) v závislosti na počtu děr v ploše vzorku – postupná perforaci skrz celý vzorek

3.2 Akustická pohltivost

Na obrázku 24 až 28 můžeme pozorovat změnu závislosti koeficientu akustické pohltivosti α na frekvenci při různé míře perforace pěny Wulfmeyer pro sendvič o kompozici F700m-Wulfmeyer.

Význam značení vzorků:

$\underbrace{K_V_nWM-1_0}$

$K_$ - Kombinace měření pro velký a malý vzorek

V_x – Vystřiženo x děr

V_n – Neperforovaný vzorek

WM – Pracovní značení pěny (Wulfmeyer)

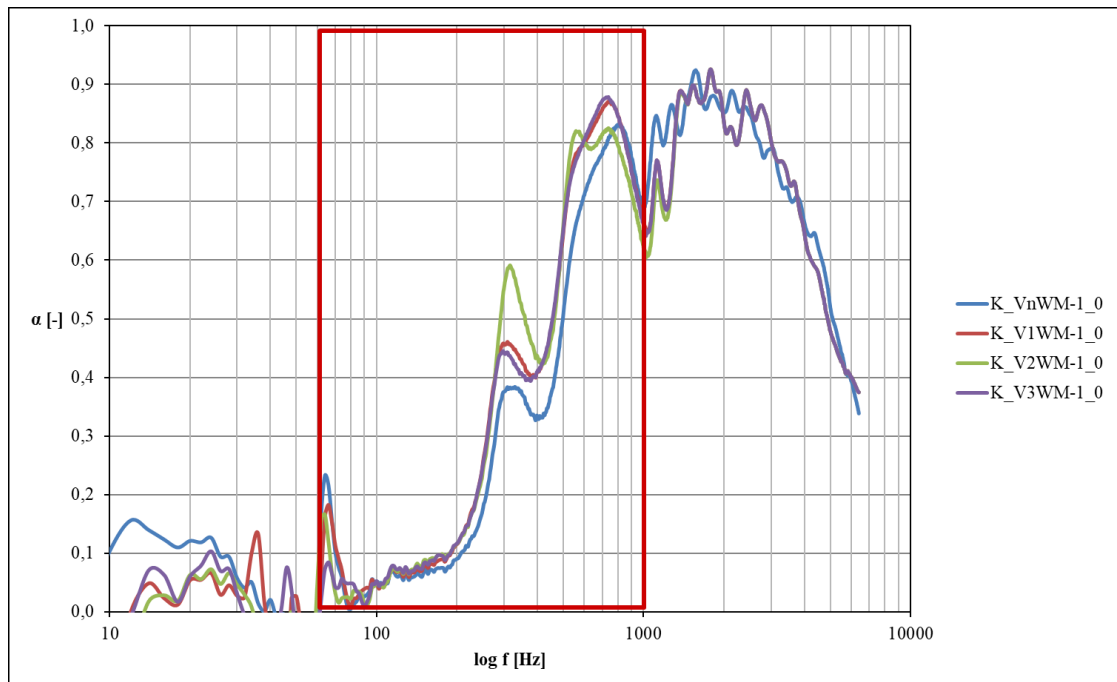
-1 – První kompozice sendviče

$_0$ – 0 mm vzduchová mezera mezi vzorkem a pístem

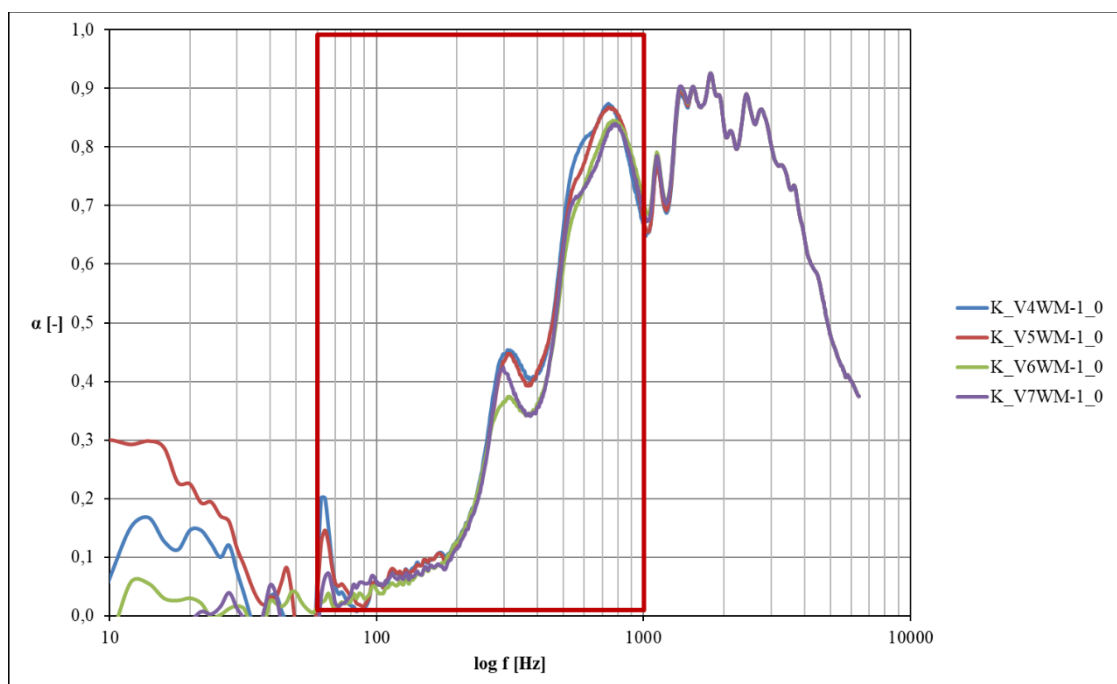
Příklady značení měření:

$K_V_nWM-1_0$ – Výsledek kombinace měření 100 a 30 mm neperforovaného vzorku pěny Wulfmeyer, první kompozice sendviče při vzduchové mezeře 0 mm mezi sendvičem a pístem impedanční trubice.

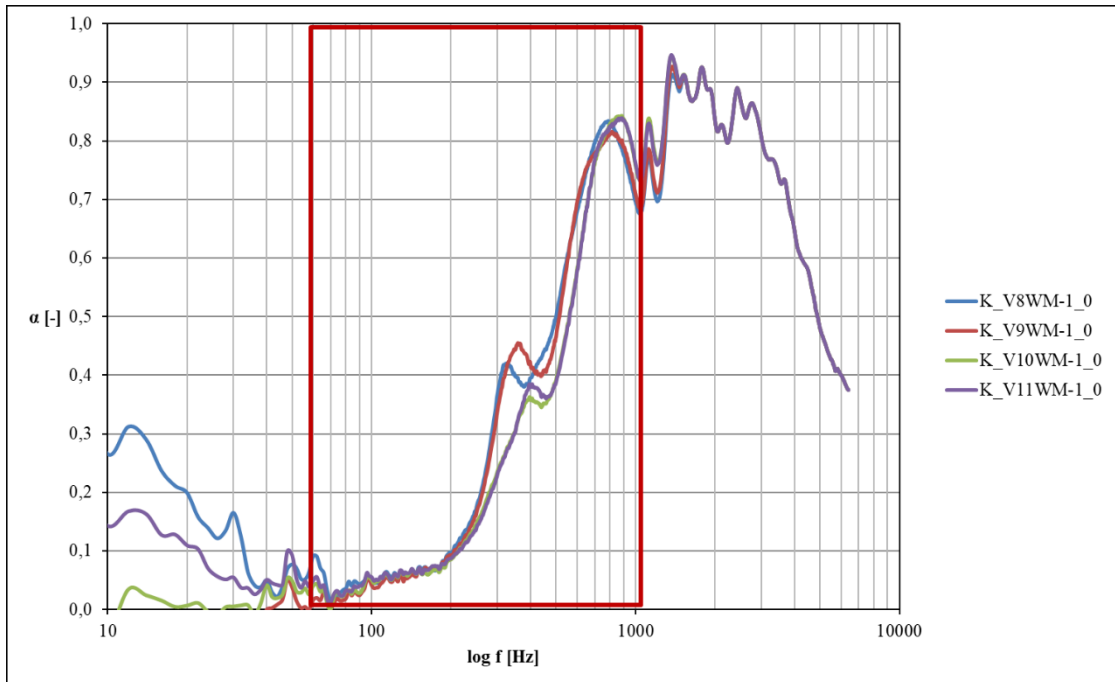
$K_V_xWM-1_0$ – Výsledek kombinace měření 100 a 30 mm vzorku při počtu x vyražených děr do vzorku pěny Wulfmeyer, první kompozice sendviče při vzduchové mezeře 0 mm mezi sendvičem a pístem impedanční trubice.



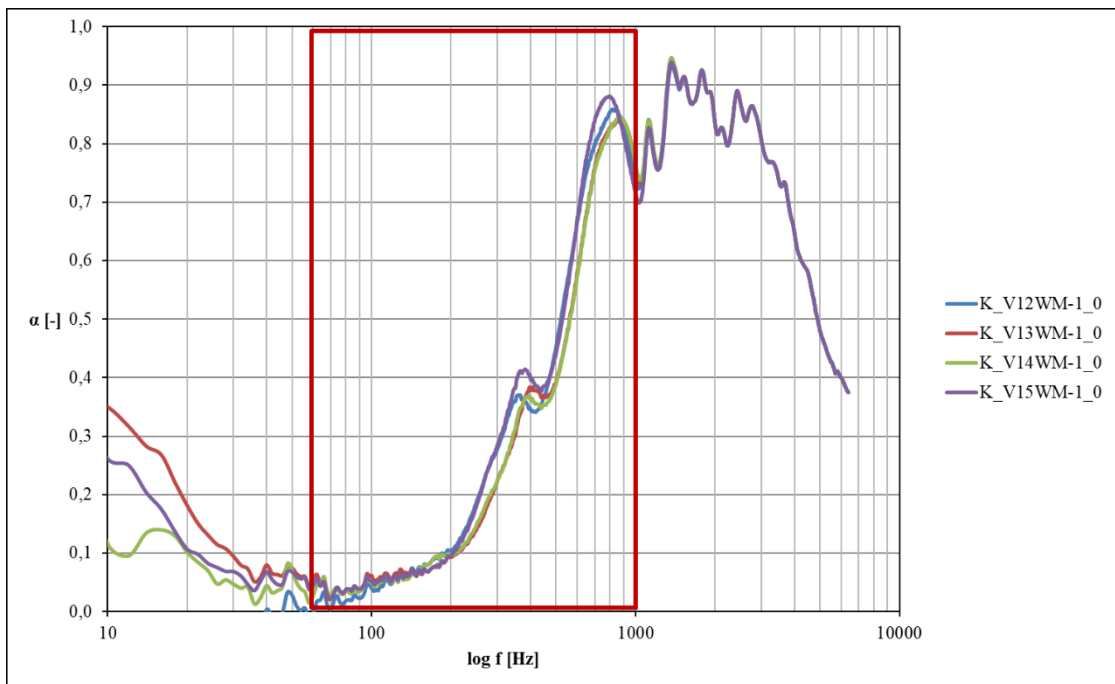
Obrázek 24: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 0 až 3 díry



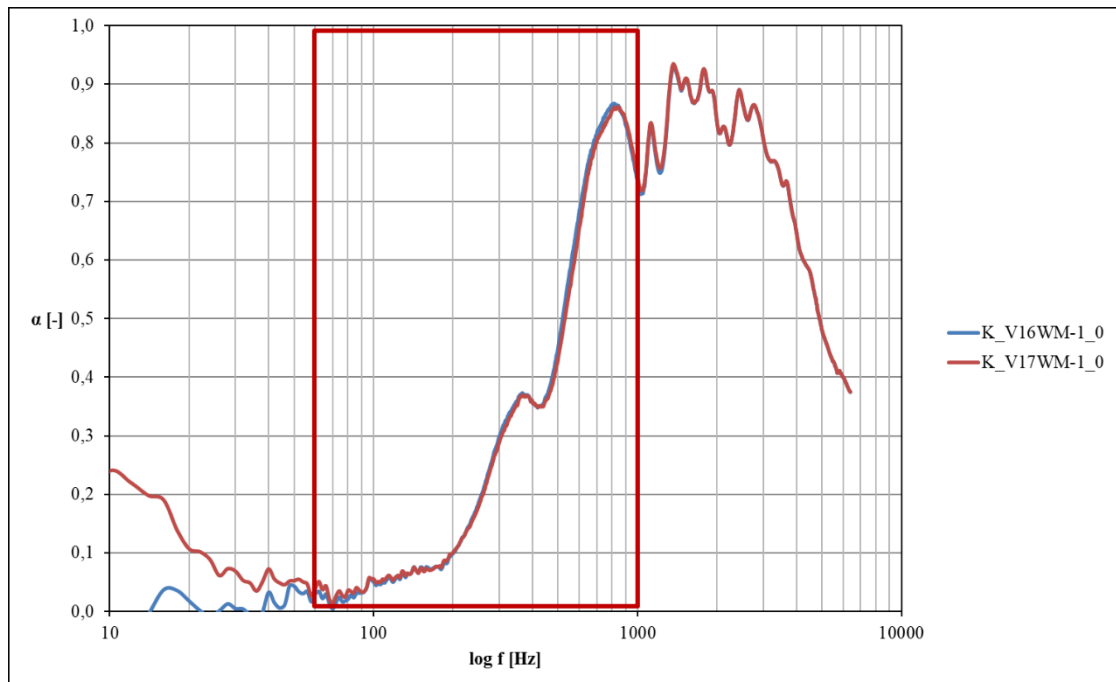
Obrázek 25: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 4 až 7 děr



Obrázek 26: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 8 až 11 děl



Obrázek 27: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 12 až 15 děl



Obrázek 28: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 16 a 17 děr

Hodnoty koeficientu akustické pohltivosti α graficky znázorněné v obrázku 24 až 28 lze dle rozdělení v kapitole 1.1.3 Koeficient akustické pohltivosti vyhodnotit takto:

Pro základní neperforovanou pěnu (K_VnWM-1_0) začíná dosahovat α hranice dostačující akustické pohltivosti ($\alpha=0,4$) přibližně při frekvenci 470 Hz. Od 470 do 1000 Hz se α pohybuje ve stejné nebo vyšší pohltivostní „třídě“. Pro perforaci 1 až 3 dírami α dosahuje hranice dostačující akustické pohltivosti již při frekvenci 280 Hz a až do 1 kHz pod tuto hranici neklesne. (Obrázek 24)

Při perforaci 4 a 5 dírami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při frekvenci 280 Hz. Při perforaci 6 dírami α dosahuje hranice při 280 Hz, ale opět padá pod ní při 310 Hz. Nad hranici se vrací spolu s perforací 7 dírami při 340 Hz. Pro žádnou z perforací 4 až 7 dírami pak už α neklesá pod hranici dostačující akustické pohltivosti až do frekvence 1kHz. (Obrázek 25)

Při perforaci 8 a 9 dírami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při 310 Hz. Avšak pro perforaci 8 dírami se α vrací pod hranici při 350 Hz a opět se vrací nad ni při 400 Hz. Při perforaci 10 a 11 děrami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při 500 Hz. Pro žádnou z perforací 8 až 11 dírami pak už α neklesá pod hranici dostačující akustické pohltivosti až do frekvence 1kHz. (Obrázek 26)

Při perforaci 15 dírami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při 360 Hz ale opět se pod ní vrací při 400 Hz. Nad ní se vrací spolu s perforací 12 dírami při 480 Hz. Při perforaci 13 a 14 dírami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při 500 Hz. Pro žádnou z perforací 8 až 11 dírami pak už α neklesá pod hranici dostačující akustické pohltivosti až do frekvence 1kHz. (Obrázek 27)

Při perforaci 16 a 17 dírami α dosahuje hranice dostatečné akustické pohltivosti při 490 Hz. Pro žádnou z perforací 16 a 17 dírami pak už α neklesá pod hranici dostačující akustické pohltivosti až do frekvence 1kHz. (Obrázek 28)

Tyto vyhodnocení jsou však nutno brát jako orientační. V praxi může být nahlíženo na hodnoty koeficientu akustické pohltivosti α jinak, než jak je popsáno v teoretické části. Tedy $\alpha = 0,4 - 0,6$ nemusí být dostačující akustická pohltivost pro specifické aplikace.

3.3 Vzduchová neprůzvučnost

Pro měření vzduchové neprůzvučnosti byla použita aparatura BaK a navíc hlukový analyzátor Mediator 2238. Následující tabulky a grafy popisují zjištěné hodnoty hlukové expozice z generovaného signálu reproduktoru impedanční trubice BaK.

Tabulka 6: Složení jednotlivých sendvičů pro měření vzduchové neprůzvučnosti

Označení	Kompozice
Zdroj	Prázdná impedanční trubice (vzduchová výplň)
Sendvič 1	F700m_VnWM_F700V
Sendvič 2	F700m_V17WM_F700V
Sendvič 3	F700m_Molitan1_F700V
Sendvič 4	F700m_Molitan2_F700V



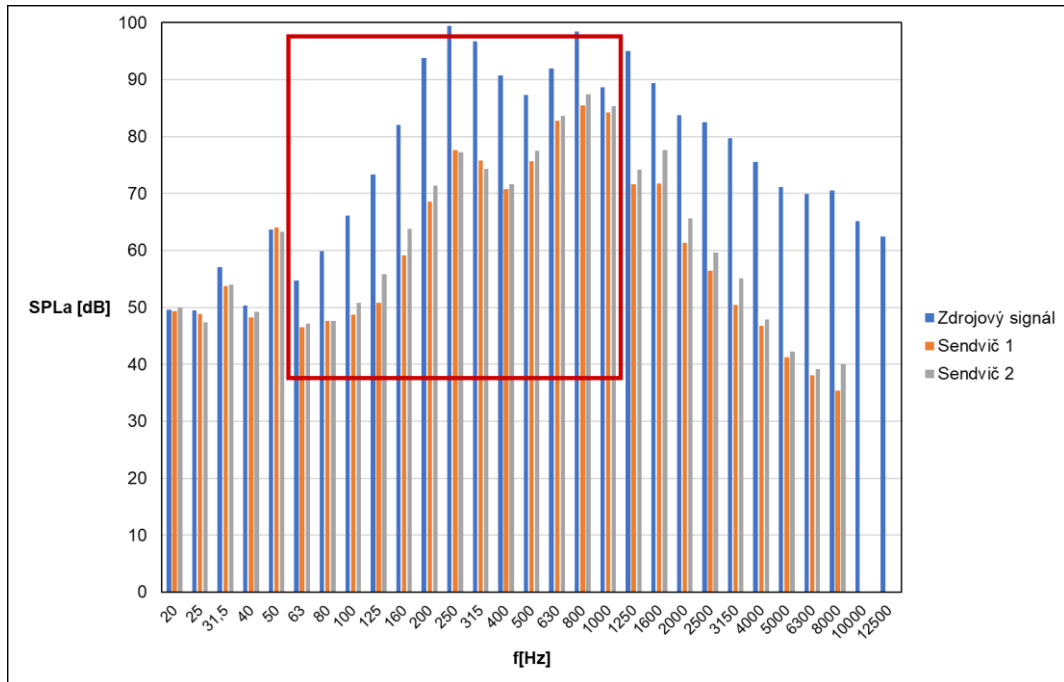
Obrázek 29: Sendviče pro měření vzduchové neprůzvučnosti vlevo sendvič s pěnou Wulfmeyer, vpravo sendvič s pěnou Molitan

Grafy, které popisují frekvenční závislost signálu prošlého přes překážku (sendvič vzorků), byly analyzovány v 1/3 oktávovém pásmu s použitím korekčního filtru typu A (pro oblast slyšitelnosti lidského ucha).

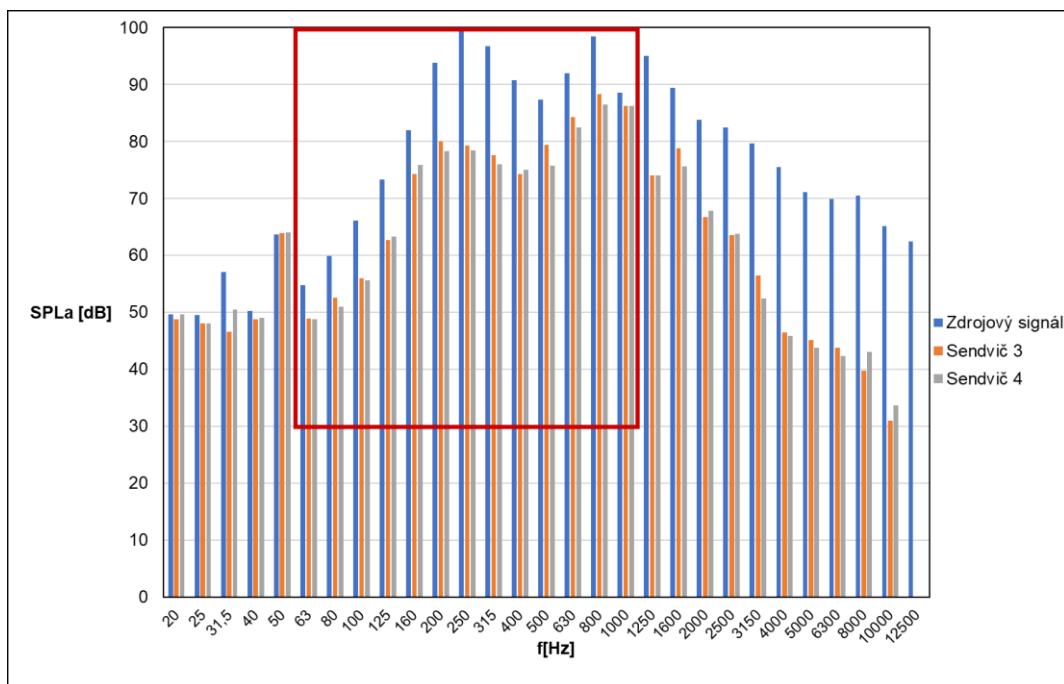
Tabulka 7: Měření vzduchové neprůzvučnosti pro pozadí a čtyři vybrané vzorky, které byly nazvány jako Sendvič 1 až 4

f [Hz]	Pozadí [dB]	Sendvič 1 [dB]	Sendvič 2 [dB]	Sendvič 3 [dB]	Sendvič 4 [dB]
20	49,6	49,3	50	48,8	49,6
25	49,5	48,9	47,4	48	48,1
31,5	57,1	53,8	54	46,6	50,5
40	50,3	48,3	49,2	48,8	49
50	63,7	64,1	63,3	63,9	64
63	54,7	46,5	47,1	48,9	48,8
80	59,9	47,6	47,7	52,6	51
100	66,1	48,8	50,8	56	55,6
125	73,3	50,8	55,8	62,7	63,3
160	82	59,1	63,8	74,3	75,9
200	93,8	68,6	71,4	80	78,3
250	99,4	77,7	77,3	79,3	78,5
315	96,8	75,8	74,3	77,6	76
400	90,8	70,8	71,7	74,3	75
500	87,3	75,7	77,5	79,4	75,7
630	92	82,8	83,7	84,3	82,5
800	98,5	85,5	87,4	88,3	86,5
1000	88,6	84,2	85,4	86,2	86,3
1250	95	71,7	74,2	74	74
1600	89,4	71,8	77,6	78,8	75,6
2000	83,8	61,3	65,7	66,7	67,8
2500	82,5	56,5	59,6	63,5	63,8
3150	79,7	50,4	55,1	56,5	52,4
4000	75,5	46,8	47,9	46,5	45,8
5000	71,1	41,3	42,3	45,1	43,8
6300	69,9	38,1	39,2	43,8	42,3
8000	70,5	35,4	40,1	39,8	43
10000	65,1	-	-	31	33,6
12500	62,5	-	-	-	-
L_{ekvi} [dB]	101,7	88,7	89,8	91,1	90,3

Hodnoty SPLa, které chybí u frekvencí 10000 a 12500 Hz nebyly zaznamenány typem mikrofonu BaK, který byl připojen na hlukoměr 2230 Mediator (BaK). Z důvodu kalibrace a frekvenčního rozsahu na hlukoměru byl nastaven dynamický rozsah snímaných hodnot na 80 dB (konkrétně v rozsahu hodnot 30 – 110 dB). Vzhledem k tomu, že je práce zaměřena na hlukovou analýzu materiálů v nízkých frekvencích, tak tyto hodnoty nejsou pro vyhodnocení zásadní.



Obrázek 30: Porovnání vzduchové průzvučnosti při měření vzorků označených „Sendvič 1 a Sendvič 2“. Frekvenční spektrum je pro SPLa zvoleno jako 1/3 oktávové



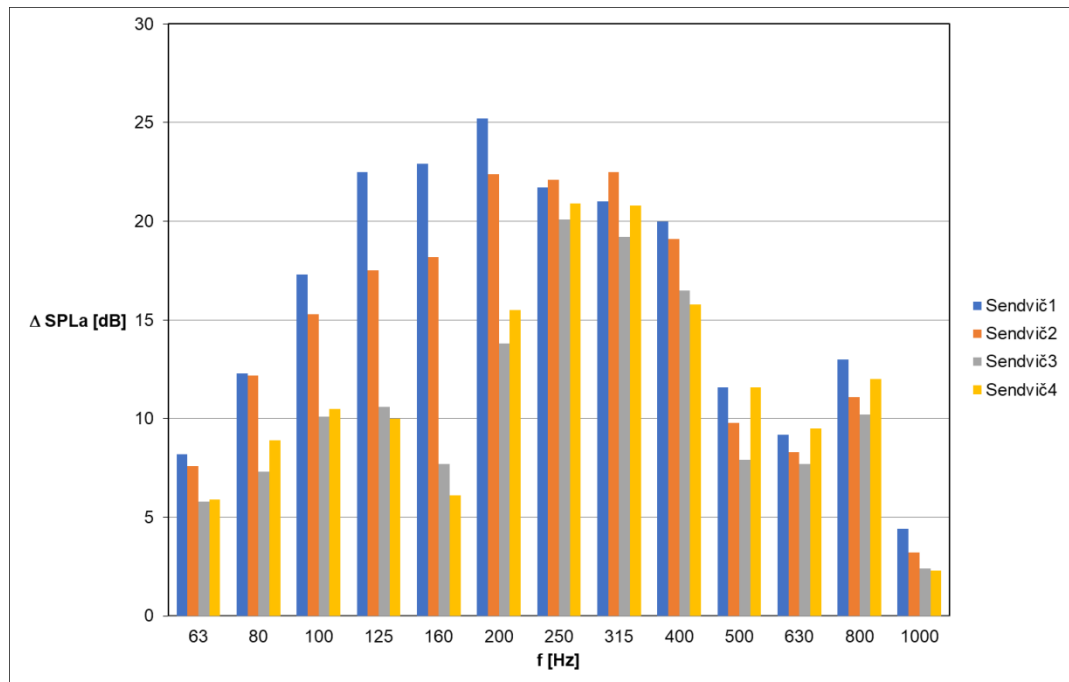
Obrázek 31: Porovnání vzduchové průzvučnosti při měření vzorků označených „Sendvič 3 a Sendvič 4“. Frekvenční spektrum je pro SPLa zvoleno jako 1/3 oktávové

V obrázku 30, ve kterém je analyzována hladina akustického tlaku (SPLa – Sound pressure level, La) v 1/3 oktávovém frekvenčním pásmu lze vidět, že rozdíly hladin SPLa začínají

mít efektivní útlum kolem hodnoty 50 Hz a nadále mají decibelový útlum v celém frekvenčním pásmu. V oblasti pod 1000 Hz, která byla pro měření analyzována bylo zjištěno, že průměrná hodnota efektivního útlumu ve frekvenčním pásmu 63 – 1000 Hz byla pro Sendvič1 = $(16,1 \pm 0,5)$ dB a pro Sendvič2 = $(14,6 \pm 0,5)$ dB (což reprezentuje $SPL_{a_{ek}}$ pro vybraný frekvenční rozsah a dobu 1:53 min). Hodnoty byly vypočteny pro rozdíl dB vůči pozadí, naměřeném jako základní zdrojový signál, vůči kterému byl zjišťován útlum (někdy se také označuje útlum vlivem překážky).

Stejně tak byly analyzovány hodnoty z obrázku 31, ve kterém jsou uvedeny hodnoty SPL pro vzorky označené Sendvič3 a Sendvič4. V grafu jsou patrné nepravidelné hodnoty útlumu ve frekvenčním pásmu pod 100 Hz. Tento jev vzniká v důsledku snížené citlivosti mikrofonů ve frekvenční oblasti 20 – 50 Hz (pro tyto případy je vhodné provést měření na citlivějším typu mikrofonu nebo provést měření s více typy mikrofonů/ v tomto měření byl nebyl tento postup realizován a byl zaměřen pouze na frekvenční rozsah od 63 – 1000 Hz). Průměrná hodnota útlumu ve frekvenčním rozsahu od 63 – 1000 Hz byla pro Sendvič 3 = $(10,7 \pm 0,4)$ dB a pro Sendvič 4 = $(11,5 \pm 0,4)$ dB (což reprezentuje $SPL_{a_{ek}}$ pro vybraný frekvenční rozsah a dobu 1:53 min).

Na obrázku 32 je možno vidět zmíněné rozdíly mezi hodnotami naměřenými jako SPL_a pro vzorky Sendviče 1-4. Z rozdílu hodnot získaných ve frekvenčním pásmu 63-1000 Hz bylo zjištěno, že nejvyšších rozdílů vůči zdroji pozadí dosahoval vzorek s označením Sendvič1.



Obrázek 32: Rozdíly SPLa pro vybrané vzorky (Sendviče 1-4)

ZÁVĚR

V teoretické části této práce byly shromážděny informace z oboru akustiky související s tématem práce. Tematicky se práce orientuje především na ty veličiny, které byly s ohledem na splnění cílů bakalářské práce důležité. Jedná se především o charakteristiku použitých materiálů, koeficient zvukové pohltivosti, NRC koeficient a vzduchovou neprůzvučnost.

V praktické části byly měřeny vybrané materiály a jejich vzájemné kombinace, které poskytovaly adekvátní hodnoty vybraných veličin (koeficientu akustické pohltivosti, NRC a vzduchovou neprůzvučnost).

Pro tepelně/zvukově izolační pěnu MP15FR (Wulfmeyer) byla navržena jak celková neperforovaná struktura, ale také perforace postupným děrováním. Tímto postupem se ukázalo, že vznikající otvory mají jednoznačný vliv na změnu koeficientu zvukové pohltivosti. S ohledem na počet otvorů, který byly realizovány, bylo zjištěno, že pohltivost se mění při 7-10 otvorech, a to zcela minimálně mezi hodnotami 0,5 – 0,6. Naproti tomu je úbytek hmotnosti poměrně významný až do 7,5 hmotnostních procent u všech otvorů. Koeficient zvukové pohltivosti, který byl měřen pro všechny kombinace materiálového složení a perforací ukazuje, že lze upravit částečně pík vznikající v oblasti 400 – 600 Hz. S ohledem na postupnou perforaci, tedy odebrání materiálu krok po kroku, není koeficient zvukové pohltivosti zásadní.

Naproti tomu velmi dobrých výsledků bylo dosaženo při měření vzduchové neprůzvučnosti, která ukazuje, že do hranice až 20 dB lze získat efektivní útlum vlivem překážky. V oblasti nízkých frekvencí jsou výsledky relativně stabilní a vykazují hodnoty od 10 – 20 dB ve frekvenčním rozsahu 63 – 1000 Hz.

V rámci reálné technické aplikace by se dalo uvažovat nad použitím perforované pěny MP15FR v sendviči spolu s CELLO F700 HR HO v leteckém průmyslu s ohledem na maximální rozměry tlumící vrstvy. Vzhledem k tomu, že se pěna MP15FR využívá jako tepelně izolační vrstva by bylo vhodné zhodnotit tuto vlastnost pro perforovaný vzorek.

Získané výsledky ukazují, že perforací lze ovlivnit akustické chování materiálů ve frekvenčním pásmu do 1000 Hz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Praha: České vysoké učení technické, 1995, 390s. ISBN 80-01-01306-5.
2. KHAN, Saad A., PRUD'HOMME, Robert K., ed. *Foams: Theory, Measurements, and Applications*. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. ISBN 0-8247-9395-1.
3. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 1. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o, 2016 [cit. 2020-05-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
4. KLEMPNER, Daniel a Kurt Charles FRISCH. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. New York: Distributed in U.S.A. and Canada by Oxford University Press, c1991. ISBN 34-461-5097-8.
5. *Polyurethanes* [online]. ISOPA, 2012 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.polyurethanes.org/en/what-is-it/timeline>
6. JUŘIČKA M. Materiály pro tlumení hluku a vibrací v leteckém průmyslu na bázi polyuretanů. Disertační práce, UTB Zlín, Zlín 2008
7. Josef Mleziva, *Polymery –výroba, struktura, vlastnosti a použití*, Praha, Sobotáles, 1. vydání, 1993, 525 s., ISBN: 8090157041
8. LAZZERI, Andrea. Exploitation of Arundo donax L. Hydrolysis Residue for the Green Synthesis of Flexible Polyurethane Foams. In: *ResearchGate* [online]. ResearchGate, 2008 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Reactions-of-isocyanate-with-water-a-amine-b-urea-c-urethane-d-and-carboxylic_fig1_315703470
9. PARK, Soon-Hong. Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2013, 332(20), 4895-4911 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.04.029. ISSN 0022460X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X13003684>
10. MENG, H., M.A. GALLAND, M. ICHCHOU, O. BAREILLE, F.X. XIN a T.J. LU. Small perforations in corrugated sandwich panel significantly enhance low frequency sound absorption and transmission loss. *Composite Structures* [online]. 2017, **182**, 1-11 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.103. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822317315829>

11. TANG, Xiaoning a Xiong YAN. Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2017, **101**, 360-380 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.002. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X17302609>
12. PE-Foam MP15FR. *Wulfmeyer: aircraft interior* [online]. Langenhagen, 2018 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://www.wulfmeyer.com/fileadmin/downloads/publicfiles/PE-Foam_Insulation_Application.pdf
13. Cello F700 FR HO. *Cellofoam* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.cellofoam.cz/vyrobky/hledat-vyrobek/detaily-vyrobku/produkty/cello-f700-fr-ho/>
14. Základní sortiment PUR pěn. *HG Style* [online]. Kojetín, 2015, 2015 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: http://hgstyle.cz/home/polyuretanova_pena/
15. Hydraulický vysekávací stroj ZPS 06102 P1. In: *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Fakulta technologická* [online]. Zlín [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/wp-content/uploads/2018/04/8882.jpg>
16. *General questions about LFN* [online]. University of Salford Manchester [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.salford.ac.uk/research/sirc/research-groups/acoustics/psychoacoustics/low-frequency-noise/frequently-asked-questions>
17. *Low Frequency Noise: Identification and Mitigation* [online]. 2014 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.noisesolutions.com/low-frequency-noise-identification-and-mitigation/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Koeficient zvukové pohltivosti
f	Frekvence
T	Perioda
ω	Úhlová frekvence
λ	Vlnová délka
c	Rychlost zvuku v daném prostředí
R	Vzduchová neprůzvučnost
β	Koeficient zvukové odrazivosti
τ	Koeficient průzvučnosti
I	Intenzita zvuku vlny
ε	Koeficient přeměny
L_p	Hodnota hladiny akustického tlaku
A_2	Celková pohltivost přijímacího prostoru
S	Plocha dělicí stěny
D	Stupeň zvukové izolace
p	Efektivní hodnota akustického tlaku
p_0	Referenční hodnota akustického tlaku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Intezitní a frekvenční pásmo ve slyšitelné poblasti [1].....	10
Obrázek 2: Šíření zvuku po vlnoplochách od zdroje [1]	11
Obrázek 3: Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu [1], v kolečku označené hodnoty jsou v praxi nejpoužívanější.....	13
Obrázek 4: Stupeň zvukové izolace jako funkce vzduchové neprůzvučnosti, pohltivosti prostoru a rozměru dělicí stěny [1]......	16
Obrázek 5: Závislost akustického koeficientu pohltivosti na frekvenci pro pěny s uzavřenými póry („EV“) a otevřenými póry („S3535F“), křivky reprezentují rozdíl mezi vlastní strukturou pórů a jejich vlivu na pohltivost [6]	18
Obrázek 6 :Polyuretanová vazba	19
Obrázek 7: Reakce s vodou jako nadouvadlem [8]	19
Obrázek 8: Strukturní vzorec polyethylenu	20
Obrázek 9: Esterová vazba	20
Obrázek 10: Vzorek pěny s otevřenými póry	23
Obrázek 11: Vzorek pěny s uzavřenými póry	23
Obrázek 12: Vzorek vláknové netkané textilie.....	23
Obrázek 13: Vzor perforace pro vzorek s označením „Molitan 2“	24
Obrázek 14: Vysekávací nože a podložná deska pro vysekávání vzorků.....	25
Obrázek 15: Hydraulický vysekávací stroj ZPS 06102 P1 pro vysekávání vzorků dle tvarových nožů 100 a 30 mm [15].....	25
Obrázek 16: Schéma celkové měřicí aparatury	26
Obrázek 17: Řez impedanční trubicí s měřeným vzorkem.....	26
Obrázek 18: Reálná aparatura pro měření koeficientu akustické pohltivosti (konfigurace pro měření vyšších frekvencí) – na obrázku je zachycena malá trubice.....	27
Obrázek 19: Aparatura pro měření vzduchové neprůzvučnosti.....	28
Obrázek 20: Měření sendviče na vzduchovou neprůzvučnost.....	28
Obrázek 21: Pěna Wulfmeyer (100 mm) neperforovaná verze vlevo, vpravo perforovaná verze se značeným postupem perforace.....	29
Obrázek 22: Ruční děrovač materiálů	29
Obrázek 23: Změna NRC (Noise reduction coefficient) v závislosti na počtu děr v ploše vzorku – postupná perforaci skrz celý vzorek	32
Obrázek 24: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 0 až 3 díry.....	34
Obrázek 25: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 4 až 7 děr	34
Obrázek 26: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 8 až 11 děr	35
Obrázek 27: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 12 až 15 děr	35
Obrázek 28: Závislost koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci pro 16 a 17 děr.....	36

Obrázek 29: Sendviče pro měření vzduchové neprůzvučnosti vlevo sendvič s pěnou Wulfmeyer, vpravo sendvič s pěnou Molitan	38
Obrázek 30: Porovnání vzduchové průzvučnosti při měření vzorků označených „Sendvič 1 a Sendvič 2“. Frekvenční spektrum je pro SPLa zvoleno jako 1/3 oktávové.....	40
Obrázek 31: Porovnání vzduchové průzvučnosti při měření vzorků označených „Sendvič 3 a Sendvič 4“. Frekvenční spektrum je pro SPLa zvoleno jako 1/3 oktávové.....	40
Obrázek 32: Rozdíly SPLa pro vybrané vzorky (Sendviče 1-4)	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Popis použitých materiálů dle materiálových listů [12, 13, 14]	24
Tabulka 2: Změna hmotnosti 100 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci	30
Tabulka 3: Změna hmotnosti 30 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci	30
Tabulka 4: Změna plochy 100 mm vzorku pěny Wulfmeyer při postupné perforaci.....	31
Tabulka 5: Změna „Noise reduction coefficient“ (NRC) při postupné perforaci	31
Tabulka 6: Složení jednotlivých sendvičů pro měření vzduchové neprůzvučnosti.....	38
Tabulka 7: Měření vzduchové neprůzvučnosti pro pozadí a čtyři vybrané vzorky, které byly nazvány jako Sendvič 1 až 4.....	39