

# **Vliv technologie výroby materiálů na jejich světelně technické vlastnosti**

Ing. Pavel Hrbáček, Ph.D.

Teze disertační práce

Teze disertační práce

## **Vliv technologie výroby materiálů na jejich světelně technické vlastnosti**

**The influence of material production technology on their light-  
technical properties**

Autor: Ing. Pavel Hrbáček, Ph.D.

Studijní program: P0788D270012 / Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
prof. Ing. Ivan Hudec, Ph.D.  
doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Zlín, červen 2025

© Pavel Hrbáček

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.

Publikace byla vydána v roce 2025.

**Klíčová slova:** *Lehký aktivní skleněný materiál, ovčí vlna, prostup světla, pohlcení světla, software Wdls 5.0.*

**Key words:** *Light active glass material, sheep wool, light transmission, light absorption, Wdls 5.0 software.*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-343-0

## ABSTRAKT

V rámci studia vlivu technologie výroby materiálů na jejich světelně technické vlastnosti byla zkoumána propustnost světla u světla aktivních skleněných materiálů, které se běžně uplatňují jako okenní a dveřní výplně v obytných budovách. Byly vyhodnoceny různé faktory, které mají vliv na šíření světla zkoumanými skleněnými materiály.

Absorpce světla byla zkoumána u 3D tištěných materiálu z polyethyltereftalátglykolu (PETG), vyrobených se dvěma typy otvorů, a to s otvory kruhového a čtvercového tvaru. Kromě toho byly otvory vytištěny s různými rozměry, hloubkami, tvary a rozestupy otvorů. V této studii byly hodnoceny různé faktory ovlivňující schopnost materiálu pohlcovat světlo.

V rámci využití vláken ovčí vlny v polymerních kompozitech bylo realizováno studium vlastností prostupu světla epoxidových (EP) a polyesterových (PES) pryskyřic, z nichž každá byla naplněna různými koncentracemi ovčí vlny. Studie ukázala, že obsah ovčí vlny v polymerních kompozitech významně ovlivnil jejich světelné vlastnosti.

U některých testovaných skleněných materiálů a také u některých polymerních kompozitů plněných vláknou z ovčí vlny byl pomocí softwaru Wdls 5.0 matematicky simulován vliv prostupu světla na kvalitu denního světla v referenční místnosti.

Vliv podmínek 3D tisku na světelné vlastnosti materiálů byl zkoumán na vzorcích vyrobených z materiálů s kyselinou polymléčnou (PLA), polymethylmethakrylátem (PMMA) a polyethyltereftalátglykolem (PETG). Materiály byly vyrobeny pomocí technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Konkrétně byl u studovaných polymerních materiálů zkoumán vliv průměru trysky, výšky vrstvy a teploty tisku na propustnost světla.

## **ABSTRACT**

As part of the study of the influence of material production technologies on their light-technical properties, the light transmission of light-active glass materials, which are used as window and door fillings in residential buildings, were investigated. Various factors influencing the propagation of light and noise through the investigation of glass materials were evaluated.

Light absorptions were investigated in 3D printed samples of polyethylene terephthalate glycol (PETG) material made with two types of holes, namely circular and square shaped holes. In addition, holes were printed with different dimensions, depths, shapes and surface spacing. Different factors influencing the material's ability to absorb light were evaluated in this study.

In the interest of the possible use of sheep wool fibers in polymer composites, the study of the light transmission properties of epoxy (EP) and polyester (PES) resins, each filled with different concentrations of sheep wool. The study showed that the content of sheep wool in polymer composites reflects their physical properties.

Using the Wdls 5.0 software, the effect of light transmission through the tested glass materials and polymer composites filled with sheep wool fibers on the quality of daylight in the reference rooms was also mathematically simulated.

The effect of 3D printing conditions on the light properties of materials was investigated on samples made of materials with polylactic acid (PLA), polymethyl methacrylate (PMMA) and polyethylene terephthalate glycol (PETG). The materials were produced using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Specifically, the effect of nozzle diameter, layer height and printing temperature on light transmission was investigated for the studied polymer materials.

## OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| ABSTRAKT .....  | 3         |
| ABSTRACT .....  | 4         |
| ÚVOD.....   | 7         |
| <b>1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>                       | <b>8</b>  |
| 1.1 Význam světelných vlastností .....                                  | 8         |
| 1.2 Kritické zhodnocení současného stavu .....                          | 8         |
| <b>2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>                                    | <b>11</b> |
| <b>3. TEORETICKÝ RÁMEC .....</b>  | <b>12</b> |
| 3.1 Osvětlenost.....  | 12        |
| 3.2 Činitel denní osvětlenosti.....                                     | 12        |
| 3.3 Rovnoměrnost denního osvětlení.....                                 | 12        |
| 3.4 Světelný tok .....  | 13        |
| 3.5 Činitel odrazu světla .....   | 13        |
| 3.6 Činitel pohltivosti světla .....                                    | 13        |
| 3.7 Činitel prostupu světla .....                                       | 13        |
| <b>4. VÝROBA A PŘÍPRAVA TESTOVANÝCH VZORKŮ .....</b>                    | <b>14</b> |
| 4.1 Skleněné vzorky pro měření prostupu světla .....                    | 14        |
| 4.2 Polymerní vzorky pro měření světelné pohltivosti .....              | 14        |
| 4.3 Kompozity plněné ovčí vlnou pro měření prostupu světla .....        | 15        |
| 4.4 Polymerní vzorky pro výzkum vlivu parametrů 3D tisku .....          | 17        |
| <b>5. METODY TESTOVÁNÍ A JEJICH VÝSLEDKY .....</b>                      | <b>18</b> |
| 5.1 Studie absorpce světla 3D tištěných vzorků .....                    | 18        |
| 5.1.1 Princip měření absorpce světla .....                              | 18        |
| 5.1.2 Výsledky měření absorpce světla.....                              | 19        |
| 5.2 Studie prostupu světla skleněnými vzorky .....                      | 20        |
| 5.2.1 Princip měření světelné propustnosti skla.....                    | 20        |
| 5.2.2 Výsledky měření propustnosti světla testovaných skel .....        | 21        |
| 5.3 Studie propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou .....      | 22        |
| 5.3.1 Výsledky měření propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou | 22        |
| 5.4 Studie vlivu parametrů 3D tisku na vstup světla .....               | 22        |
| 5.4.1 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů .....   | 23        |
| 5.4.2 Mikroskopická analýza vzorků polymerů vyrobených 3D tiskem .....  | 24        |
| 5.5 Matematické simulace kvality denního osvětlení.....                 | 25        |
| 5.5.1 Simulace kvality denního osvětlení pro vzorky skla .....          | 25        |
| 5.5.2 Simulace kvality denního osvětlení pro polymerní kompozity .....  | 26        |
| 5.5.3 Simulace vlivu odraznosti ploch na denní osvětlenost .....        | 26        |
| <b>6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI .....</b>                                 | <b>27</b> |
| <b>7. ZÁVĚR.....</b>  | <b>29</b> |
| Seznam použité literatury .....   | 30        |

|  |    |
|--|----|
| Seznam obrázků.....                    | 31 |
| Seznam tabulek.....                    | 32 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk..... | 33 |
| Publikační aktivity autora.....        | 34 |
| Odborný životopis autora .....         | 35 |

# ÚVOD

Moderní architektura využívá co nejvíce denního osvětlení a zároveň klade důraz na jeho optimalizaci spolu s prevencí možného oslnění. Ve vnitřním prostoru však může být oslnění způsobeno také zdroji světla a svítidly, nebo odrazy od lesklých povrchů.

Pohlcováním nežádoucího světla s vyloučením oslnění odraženým světlem se zabývá studie vlivu geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných PETG materiálů. V této studii jsou zkoumány možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s ohledem na možnosti jejich využití v uzavřených místnostech jako podhledů nebo lehkých stěn či obložení.

Propustnost světla byla zkoumána nejprve u skleněných materiálů, které se používají jako okenní a dveřní výplně a v další studii také u kompozitů pryskyřice/ovčí vlna, které mohou sloužit např. jako náhražka skleněných tvárnic nebo skleněných příček. V případě ovčí vlny se navíc jedná o příspěvek k efektivnějšímu využití tohoto dosud podceňovaného a nedostatečně využívaného obnovitelného zdroje.

Díky matematickým simulacím bylo možno ilustrovat vliv propustnosti světla těchto světelně činných materiálů na kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.

Vliv podmínek 3D tisku na fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů byl zkoumán na vzorcích vyrobených z materiálů s kyselinou polymléčnou (PLA), polymethylmethakrylátem (PMMA) a polyethylentereftalátglykolem (PETG). Materiály byly vyrobeny pomocí technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Konkrétně byl u studovaných polymerních materiálů zkoumán vliv průměru trysky, výšky vrstvy a teploty tisku na prostup světla. Studie dospěla k závěru, že podmínky 3D tisku významně ovlivňují strukturu a povrch 3D tištěných vzorků polymerů spolu s propustností světla.

# 1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

## 1.1 Význam světelných vlastností

Světelné vlastnosti materiálů mají přímý vliv na zdraví člověka, což musí být při návrhu budov zohledňováno. Je nanejvýš potřebné zajistit dostatek světla v prostorách, ve kterých vykonáváme zrakově náročnou činnost a trávíme zde většinu času. Pro naše zdraví je ideální žít v psychické pohodě a denní světlo je v tomto ohledu nenahraditelné. Pro dané místnosti platí normy, které projektant musí dodržovat. Projektanti při návrhu budov pro tyto účely využívají počítačových simulací, díky nimž lze matematicky modelovat vliv prostupu světla okenních výplní na kvalitu denního světla v referenční místnosti. Vedle prostupu světla hraje přitom důležitou roli i odraz světla od světelně činných prvků.

Je důležité si uvědomit, že na každou místnost klademe jiné požadavky. Zatímco pro denní část domu jako je kuchyň či pracovna potřebujeme světla co nejvíce, pro noční místnosti a skladovací prostory je maximum světla spíše nežádoucí a preferujeme v nich přítomnost klidu. V jiných prostorech je nutné zajistit bezpečnost a pocit soukromí. Známé je rozdělení domu na denní a noční část. V promítacích a koncertních sálech je vedle akustiky kladen důraz také na prevenci možného oslnění, přičemž ve vnitřním prostoru by mohlo docházet k oslnění odrazem od lesklých povrchů. Proto je nutné zabývat se také pohlcováním nežádoucího světla a s tím spojeným studiem vlivu tvaru a struktury materiálu na odraz a absorpci světla.

## 1.2 Kritické zhodnocení současného stavu

V praxi se ukazuje, že světelné vlastnosti používaných světelně činných materiálů nejsou řádně prozkoumány, popsány a experimentálně ověřeny. Z těchto důvodů ani nemohou být při stavebním projektu správně zohledněny. Nejedná se jen o skleněné výplně oken a dveří, ale o veškeré světelně činné materiály, které se v místnostech podílejí na distribuci světla. Matematické výpočty a simulace kvality denního osvětlení pracují s neúplnými či zkreslenými údaji o propustnosti světla a jejich výsledky neodpovídají realitě.

Jelikož projektant před samotnou realizací stavby při matematických simulacích často vychází z nepřesných dat a přibližných odhadů či mylných předpokladů, tak po realizaci nemůže dojít k očekávanému výsledku a osvětlenost uvnitř místnosti neodpovídá normám a stává se tak nevyhovující. Tím, že jsou na každou místnost kladeny jiné požadavky, je zapotřebí také použít vhodný typ skla. Zájemce, který si však chce správně vybrat a porovnat si přitom skleněné výplně

podle prostupu světla, nemá zpravidla k dispozici ucelený a ověřený přehled těchto parametrů. Skleněným výplním jsou často mylně nebo i zcela záměrně prisuzovány vlastnosti, které ve skutečnosti nesplňují a po technické stránce ani splňovat nemohou. Případné kusé informace, založené na nepodloženém a neověřeném tvrzení výrobce či dodavatele, mohou být pouhým obchodním trikem, jehož cílem je pouze přilákat zákazníky. Údaje o propustnosti světla jsou tedy často zkreslené, jindy tyto údaje nejsou k dispozici vůbec [1,2].

Dojde-li k výměně oken do stejných stavebních otvorů, potom s novými okny obvykle dochází ke zhoršení denní osvětlenosti v místnosti. Stává se tak především z důvodu zmenšení prosklené plochy oken, jelikož se u nových oken zvětšuje podíl rámu na úkor skla v porovnání s okny starými [3].

Opomíjeným faktem však je, že moderní tepelně izolační zasklení vykazuje výrazně nižší propustnost světla než původní okna se starými a často jednoduchými skly. Složení dvojskel a trojskel se liší od představ řady projektantů, kteří z neznalosti mylně uvažují o dvou či třech stejných tabulích skla řazených za sebou [3,4].

Chybí seriózní studie prostupu světla u okenních výplní, což by přispělo k tomu, aby opravdová denní osvětlenost po realizaci stavby lépe odpovídala matematickým simulacím prováděným ještě ve fázi projektu. K tomu, aby mohli být splněny platné normy, však musí být prakticky ověřeno, jaké jsou skutečné a nezkreslené hodnoty propustnosti nového zasklení.

Dalším problémem je, že matematické simulace pro hodnocení kvality denní osvětlenosti v případě odrazu světla světelně činných ploch zohledňují především barevné provedení jednotlivých povrchů v místnosti. Odraz světla však není jen otázkou barevného provedení, ale také tvaru či struktury materiálu a řady dalších faktorů mezi nimiž hraje významnou roli především tvar a struktura povrchu. Při procesu odrazu světla se navíc světelně činný povrch stává sekundárním zdrojem světla, což v praxi významně ovlivňuje výsledek.

Většina běžně používaných programů pro světelně technické účely nepracuje se skutečnými, ale pouze s idealizovanými modely odrazu světla. Skutečné odrazné vlastnosti materiálů nejsou doposud ve světě odborných technických výpočtů dostatečně zohledňovány [5].

Ovčí vlna je jedním z nejčistších a nejekologičtějších izolačních materiálů na světě, a přesto je často spalována nebo posílána na skládky. Dobře známé je využití ovčí vlny v textilní výrobě, ale pro tyto účely jsou vybírána pouze nejkvalitnější vlákna. Přitom však nekvalitní ovčí vlnu, tento dosud nedostatečně

využívaný obnovitelný zdroj, lze používat jako izolační materiál pro zateplení pláště budov. Zkoumána již byla možnost využití ovčí vlny jako složky v různých kompozitních materiálech s tepelně izolačními vlastnostmi a schopností pohlcovat zvuk. Tyto kompozity mohou díky své nízké hmotnosti a snížené tepelné vodivosti sloužit jako izolační stavební prvek a zároveň také jako prosvětlovací otvor. Zatímco sklo je křehký materiál a ve větších formátech jej lze instalovat pouze ve svislé poloze, kompozit ve složení polymer/ovčí vlna lze díky jeho dobrým mechanickým vlastnostem instalovat v jakékoli poloze.

Dosavadní výzkum kompozitů polymer/ovčí vlna se soustředil především na mechanické vlastnosti, tepelně izolační vlastnosti, schopnosti pohlcovat zvuk či odolnost proti ohni. Aby však kompozity s ovčí vlnou mohly sloužit jako prosvětlovací otvor, bylo nutné se ještě zaměřit na prostup světla, a právě na tuto problematiku se podle autorových informací dosud nikdo nesoustředil.

3D tisk je široce rozšířenou a dostupnou aditivní technologií, která je využívána především pro výrobu prototypů. Masivnějšímu rozšíření této technologie a většímu podílu na standardní výrobě brání řada problémů. Jedná se především o soudržnost mezi jednotlivými vrstvami, pórovitost struktury, rozměrovou stabilitu a další. V této souvislosti byl již prozkoumán vliv různých parametrů 3D tisku, jakými jsou průměr trysky, orientace výplně, výška vrstvy a teplota tisku, na mechanické vlastnosti výrobků či drsnost povrchu.

Pokud je však autorovi známo, nebyla dosud publikována studie o vlivu parametrů FDM 3D tisku na světelné vlastnosti polymerních materiálů. Zatím tedy bohužel není možné optimalizovat parametry pro zvýšení efektivity se zaměřením na světelné vlastnosti. Desky z průsvitných polymerních materiálů, vyrobené 3D tiskem by mohli sloužit jako prosvětlovací otvory, přičemž na rozdíl od křehkých skel, mohou být instalovány v jakékoli poloze.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Otestovat možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s důrazem na schopnosti pohlcování nežádoucího světla.
- Prozkoumat vliv geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných materiálů.
- Prozkoumat vliv změny parametrů 3D tisku na prostup světla transparentních polymerních materiálů.
- Porovnat prostup světla skleněných materiálů, které se běžně používají jako okenní a dveřní výplně v obytných budovách.
- Vyhodnotit různé faktory ovlivňující prostup světla skleněných materiálů jako jsou zbarvení, tvar povrchu, tloušťka, vícevrstvnost.
- Pomocí matematických simulací ilustrovat, jak propustnost světla zkoumaných skel ovlivňuje kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.
- Provéřit možnost využití kompozitů polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelně činné izolační materiály.
- Prozkoumat vliv koncentrace ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích na prostup světla.
- Pomocí matematických simulací ilustrovat, jak propustnost světla, spojená s koncentrací ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích, ovlivňuje kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.

### 3. TEORETICKÝ RÁMEC

V teoretické části jsou stručně vysvětleny nejzákladnější pojmy, které jsou používány v experimentální části.

#### 3.1 Osvětlenost

Je označována také jako intenzita osvětlení  $E$  [lx] a je dána poměrem dopadajícího světelného toku  $\phi$  [lm] na elementární plochu  $S$  [m<sup>2</sup>], k velikosti této plochy:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (1)$$

#### 3.2 Činitel denní osvětlenosti

Kvantitativní kritérium denního osvětlení je definováno činitelem denní osvětlenosti  $D$  [%]:

$$D = \frac{E}{E_h} \cdot 100 \quad (2)$$

kde  $E$  [lx] - je osvětlenost naměřená v kontrolním bodě dané roviny v interiéru.

$E_h$  [lx] - osvětlenost venkovní nestíněné vodorovné roviny.

#### 3.3 Rovnoměrnost denního osvětlení

Potřebné světlo musí na dané místo dopadat nejen v dostatečném množství, ale i v příslušné kvalitě. Důležitým kvalitativním kritériem je rovnoměrnost denního osvětlení  $r$  [-]:

$$r = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (3)$$

Rovnoměrnost denního osvětlení je dána poměrem minimální hodnoty  $D_{\min}$  [%] k maximální hodnotě  $D_{\max}$  [%] činitele denní osvětlenosti naměřené na pracovní rovině v interiéru [6].

Mezi další kvalitativní kritéria patří také rozložení světelného toku, zábrana oslnění, barevné podání ploch v interiéru.

### 3.4 Světelný tok

Světelný tok  $\Phi$ , jehož jednotkou je 1 lumen [lm], vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakové vnímání. Pro přepočítání zářivých veličin na fotometrické, a naopak se používají následující rovnice [6]:

$$1 \text{ lm} = 147 \cdot 10^{-5} \text{ W} \quad (4)$$

$$1 \text{ W} = 680 \text{ lm} \quad (5)$$

### 3.5 Činitel odrazu světla

Činitel odrazu světla  $\rho$  [-] je dán poměrem odraženého světelného toku od povrchu látky k dopadajícímu světelnému toku na povrch této látky:

$$\rho = \frac{\phi_{\rho}}{\phi} \quad (6)$$

### 3.6 Činitel pohltivosti světla

Činitel pohltivosti světla  $\alpha$  [-] je dán poměrem světelného toku pohlceného látkou k dopadajícímu světelnému toku na povrch látky:

$$\alpha = \frac{\phi_{\alpha}}{\phi} \quad (7)$$

### 3.7 Činitel prostupu světla

Činitel prostupu světla  $\tau$  [-] je dán poměrem světelného toku prošlého přes látku k dopadajícímu světelnému toku na povrch látky:

$$\tau = \frac{\phi_{\tau}}{\phi} \quad (8)$$

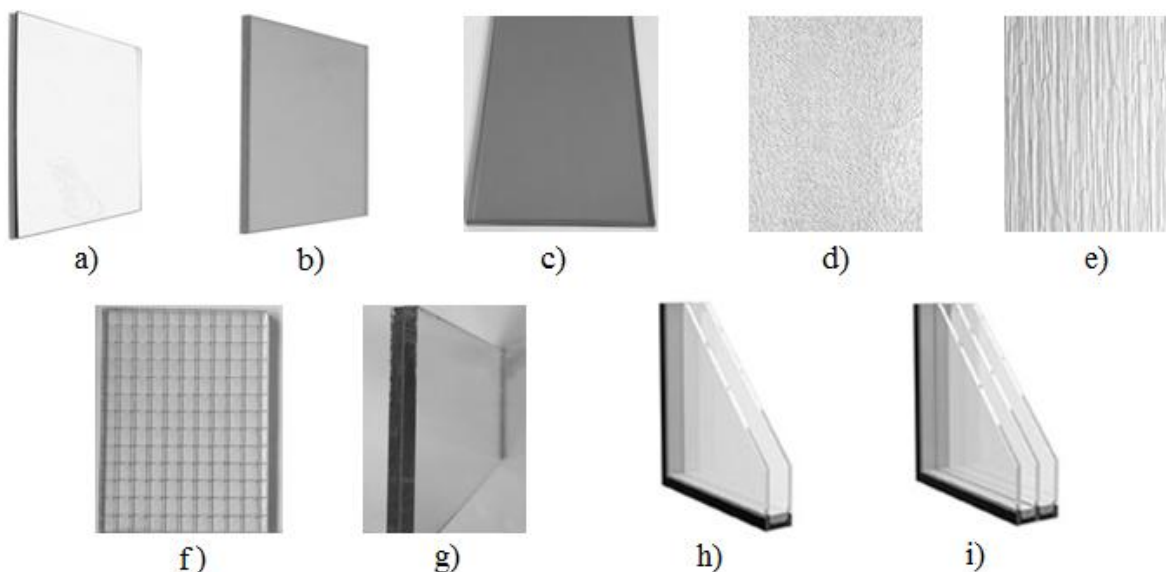
V souladu se zákonem zachování energie platí vztah:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (9)$$

## 4. VÝROBA A PŘÍPRAVA TESTOVANÝCH VZORKŮ

### 4.1 Skleněné vzorky pro měření prostupu světla

V této studii byly hodnoceny vzorky světelně aktivního skla lišící se tloušťkou, tvarem povrchu, počtem vrstev skel atd. Jednotlivé druhy skla jsou na obrázku 1. Skleněné vzorky pro měření prostupu světla byly nařezány z tabulí skla a měly rozměry 250 mm × 250 mm.

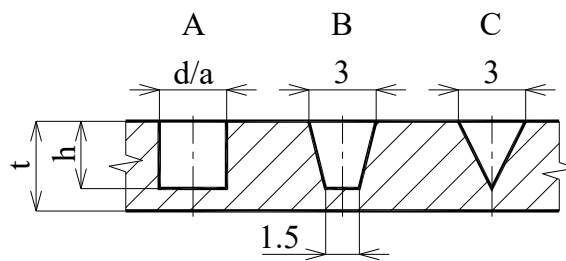


Obr. 1 Zkoumané vzorky skla: Základní čiré sklo Float (a), sklo s nízkou emisivitou LowE (b), reflexní bronzové sklo Stopsol (c), dekorativní sklo s čirou činčilou (d), a čirou kůrou (e), drátěné sklo (f), vrstvené sklo (g), dvojsklo (h), trojsklo (i)

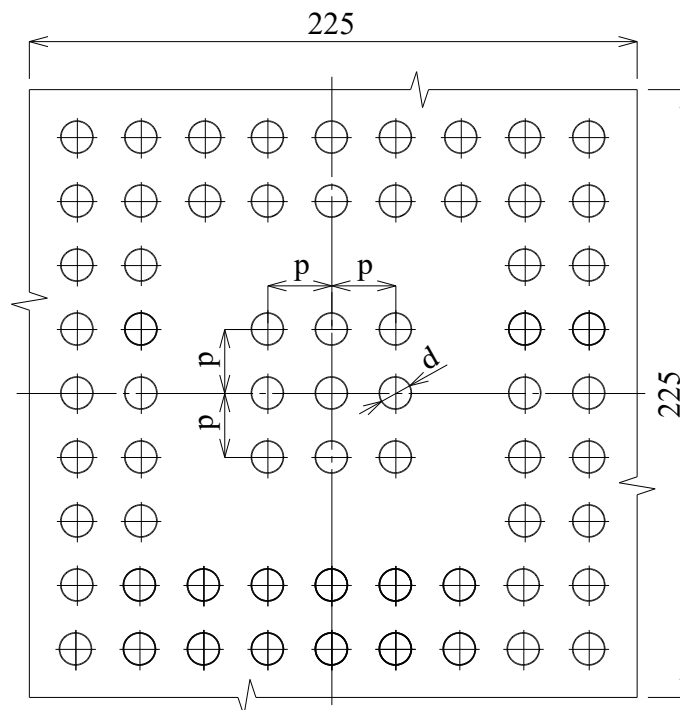
### 4.2 Polymerní vzorky pro měření světelné pohltivosti

Absorpce světla byla zkoumána na 3D tištěných vzorcích z materiálu PET-G. Vzorky byly navrženy pomocí CAD softwaru SolidWorks 2015. Následně byly vytištěny na tiskárně Creality CR-5 PRO založené na technologii FDM (Fused Deposition modelling).

Proces tisku byl prováděn při teplotě přibližně  $T = 235$  °C a rychlosti tisku  $v = 50$  mm · s<sup>-1</sup>. Vzorky byly vyrobeny s různým počtem, tvarem a velikostí povrchových otvorů. Otvory byly vyrobeny s různými charakteristickými velikostmi  $d$  nebo  $a$  (tj. 1,5 a 3 mm), hloubky  $h$  (tj. 1,5 a 3 mm), rozteče  $p$  (tj. 6 a 12 mm) a tvary. Pro účely hodnocení světelných absorpčních vlastností byly technologií 3D tisku vyrobeny čtvercové desky o tloušťce  $t = 4$  mm a straně 225 mm.



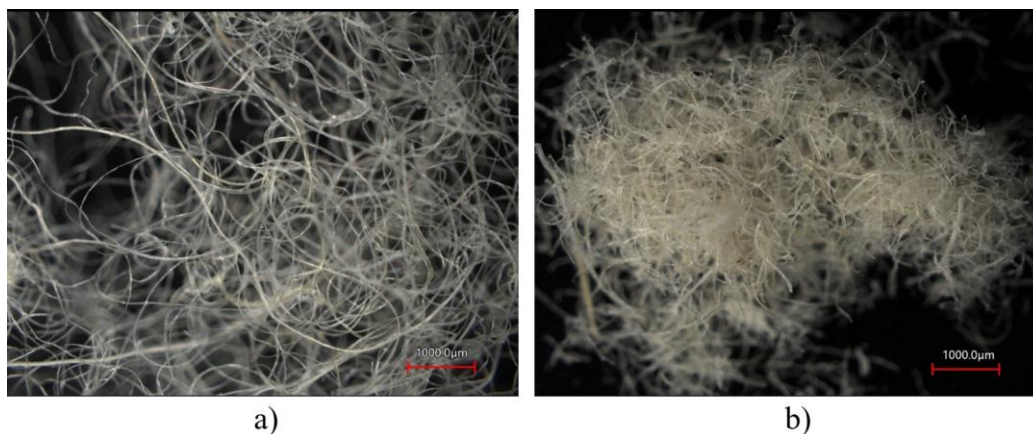
Obr. 2 Zkoumané tvary otvorů (jejich řezy): A – válec/hranol, B - komolý kužel/komolý čtvercový jehlan, C – kužel/čtvercový jehlan



Obr. 3 Rozměry vzorků s kruhovými otvory pro experimentální měření vlastností absorpce světla

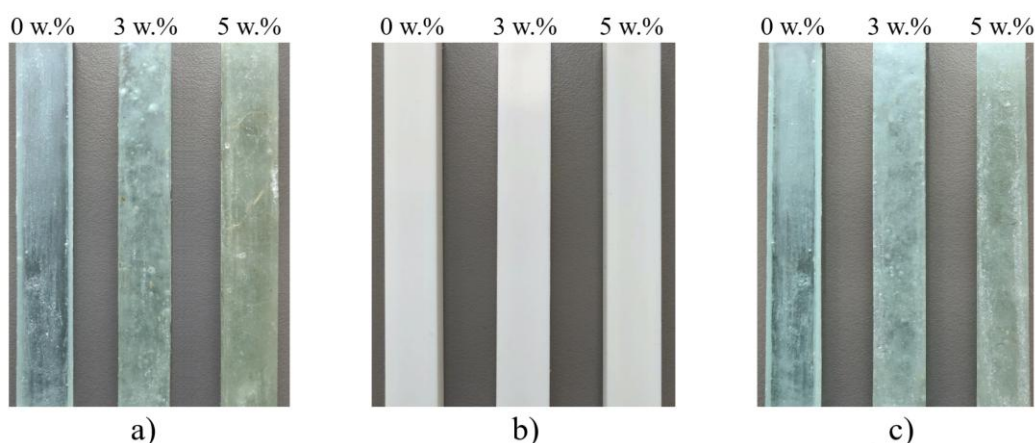
### 4.3 Kompozity plněné ovčí vlnou pro měření prostupu světla

Jako primární materiál pro výrobu kompozitů polymer/ovčí vlna byl použit izolační pás z ovčího rouna Naturwool A500/P100 od společnosti Naturwool Ltd. (Praha, Česká republika). Izolační pás z ovčího rouna se zpočátku stříhal na menší díly pomocí nůžek. Poté byla ovčí vlákna rozemleta průchodem přes síta o velikosti 3 mm a 1 mm pomocí univerzálního řezacího mlýnu PULVERISETT 19 (FRITSCH GmbH - Milling and Sizing, Weimar, Německo). Struktura ovčích vláken před a po procesu mletí byla hodnocena pomocí laserového skenovacího mikroskopu VK-X3000 (LSM, Keyence Corp., Japonsko), jak je znázorněno na obrázku 4. Bylo zjištěno, že průměr vlákna  $d$  byl v rozmezí  $(15,9 \div 39,5) \mu\text{m}$ .



Obr. 4 Mikroskopické struktury vláken ovčí vlny: (a) před procesem mletí; (b) po procesu mletí

Takto zpracovaná ovčí vlna byla následně použita k výrobě kompozitních materiálů polymer/ovčí vlna. Tři různé pryskyřice, jmenovitě epoxidové (EP), polyuretanové (PU) a polyesterové (PES) pryskyřice, byly v této studii naplněny různými hmotnostními koncentracemi ovčí vlny. Protože PU vzorky nejsou průhledné, byly z hlediska propustnosti světla experimentálně hodnoceny pouze vzorky EP a PES. Orientace plniva v polymerních matricích byla náhodná a byla provedena ručně. U studovaných vzorků byla během procesu vytvrzování pozorována tvorba zesíťovaných struktur, přičemž plnivo na bázi ovčí vlny bylo dobře dispergováno v polymerní matrici. Proces vytvrzování zahrnoval přidání příslušného tvrdidla do pryskyřice podle doporučení výrobce společností Dawex Chemical Ltd. (Praha, Česká republika). Vzorky pro měření prostupu světla měly rozměry 60 mm × 60 mm × 4 mm (délka × šířka × tloušťka).

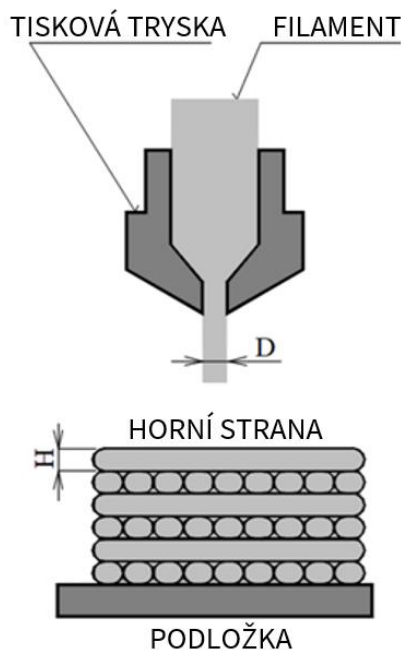


Obr. 5 Fotografie zkoumaných vzorků polymerů s různými koncentracemi ovčí vlny  $W_r$  (v hmotn. %): (a) EP vzorky; (b) PU vzorky; (c) PES vzorky

#### 4.4 Polymerní vzorky pro výzkum vlivu parametrů 3D tisku

Pro výrobu 3D tištěných vzorků za účelem zkoumání vlivu nastavených parametrů na fyzikální a mechanické vlastnosti vzorků byly použity filamentsy z materiálů polylactic Acid, kyselina polymléčná (PLA), polymethylmethakrylát (PMMA) oba od výrobce REGSHARE s.r.o., Horní Počaply, Česká republika. Filament z polymeru polyethyltereftalát glykol (PETG) byl od výrobce Spectrum Group s.r.o., Polsko. Výroba vzorků byla realizována technologií FDM na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3 (Prusa Research a.s., Praha, Česká republika).

Při výrobě vzorků 3D tiskem byly jednotlivé vrstvy ukládány střídavě, takže každá nanášená vrstva byla pootočená o 90 stupňů vzhledem k předchozí vrstvě. Tímto způsobem byl vytvořen křížový vzor, který je znázorněn na obr. 6.



Obr. 6 Schéma nanášení vrstev během výroby vzorků 3D tiskem

K výrobě vzorků byly použity dva různé průměry trysek  $D = 0,8$  mm,  $D = 0,4$  mm a dvě různé výšky vrstev  $H = 0,4$  mm,  $H = 0,2$  mm. U vzorků vyrobených tryskou o průměru  $D = 0,4$  mm byly navíc použity dvě různé teploty tisku  $T_1$ . Teplota podložky nese označení  $T_2$ .

## 5. METODY TESTOVÁNÍ A JEJICH VÝSLEDKY

Tato kapitola obsahuje především výsledky výzkumné části jednotlivých prací zaměřených na světelně technické vlastnosti zkoumaných materiálů. Jsou zde zároveň popsány také použité přístroje, metodika testování či simulací a spolu s výsledky jsou zde uvedeny i jejich interpretace.

### 5.1 Studie absorpce světla 3D tištěných vzorků

Vlastnosti absorpce světla studovaných 3D tištěných PETG vzorků byly zkoumány podle normy [ČSN 360001-1 2006]. K měření byl použit digitální luxmetr Voltcraft MS-1300.

#### 5.1.1 Princip měření absorpce světla

V prvním kroku bylo realizováno měření činitele odrazu světla na základě poměru osvětleností. Luxmetrem se nejprve změří osvětlenost daného povrchu  $E_1$  [lx], následně se za stejných podmínek změří osvětlenost  $E_2$  [lx] a to s čidlem luxmetru obráceným ke zkoumanému povrchu. Hodnota činitele odrazu světla  $\rho$  [-] se stanoví z poměru obou naměřených osvětleností:

$$\rho = \frac{E_2}{E_1} \quad (10)$$

Čidlo luxmetru musí být při tomto měření umístěno tak, aby nestínilo zkoumaný povrch a zároveň aby na samotné čidlo nedopadalo světlo z jiných světelných zdrojů. Osvětlenost  $E_2$  se proto měří ve vzdálenosti alespoň pětinásobku průměru měřicí hlavičky [6].

Experimentální měření obou osvětleností pro každý povrch vzorku byla provedena dvacetkrát, a to za rozptýleného denního světla (tj. bez umělých zdrojů osvětlení).

Absorpce světla  $\alpha$  [-] pro zkoumané neprůsvitné materiály byla následně určena ze vzorce:

$$\alpha = 1 - \rho \quad (11)$$

Nakonec byly vyhodnoceny aritmetické průměry a směrodatné odchylky absorpce pro každý ze zkoumaných 3D-tištěných vzorků.

### 5.1.2 Výsledky měření absorpce světla

V tabulkách 1 a 2 jsou zaznamenány získané výsledky, které zohledňují různé faktory ovlivňující absorpci světla  $\alpha$  [-] zkoumaných 3D tištěných vzorků a jsou porovnány s úplným 3D tištěným PETG vzorkem (F). Vzorky obsahující otvory se vyznačují vyšší schopností absorbovat světlo ve srovnání s plným, hladkým 3D tištěným PETG vzorkem (F). Je to způsobeno vícenásobnými odrazy světla, když se světlo šíří uvnitř otvorů a je doprovázeno vyšší přeměnou dopadající světelné energie na teplo. Pohltivost světla se obecně zvyšovala s rostoucím počtem povrchových otvorů (tj.  $p = 6$  mm) a jejich rozměrů (tj.  $a = d = h = 3$  mm). Další faktory, jako je tvar (tj. čtvercový nebo kruhový) a typ (tj. typ A, B nebo C) otvorů, byly z hlediska absorpce světla zanedbatelné.

Tab. 1 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků s kruhovými otvory

| Typ otvoru | $d$<br>[mm] | $p$<br>[mm] | $h$<br>[mm] | $\alpha$<br>[-]   |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| A          | 1,5         | 6           | 1,5         | $0,535 \pm 0,013$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,540 \pm 0,017$ |
|            |             | 12          | 1,5         | $0,524 \pm 0,009$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,527 \pm 0,012$ |
|            | 3,0         | 6           | 1,5         | $0,547 \pm 0,025$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,549 \pm 0,016$ |
|            |             | 12          | 1,5         | $0,534 \pm 0,011$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,536 \pm 0,018$ |
| B          | 3,0         | 6           | 1,5         | $0,541 \pm 0,023$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,547 \pm 0,019$ |
|            |             | 12          | 1,5         | $0,536 \pm 0,020$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,540 \pm 0,015$ |
| C          | 3,0         | 6           | 1,5         | $0,541 \pm 0,017$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,543 \pm 0,012$ |
|            |             | 12          | 1,5         | $0,536 \pm 0,015$ |
|            |             |             | 3,0         | $0,539 \pm 0,018$ |
| F          | –           | –           | –           | $0,505 \pm 0,019$ |

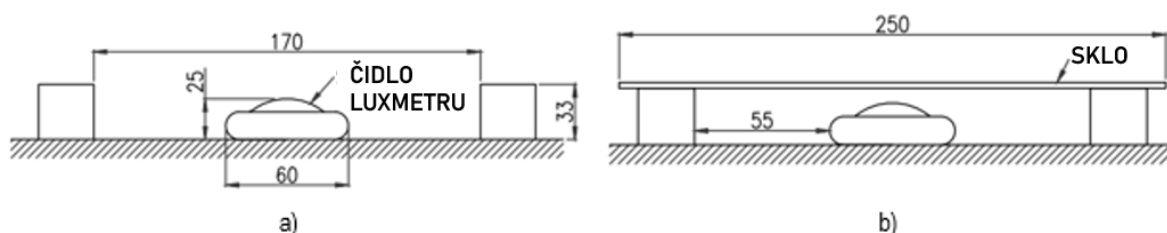
Tab. 2 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků se čtvercovými otvory

| Typ otvoru | a [mm] | p [mm] | h [mm] | $\alpha$ [-]      |
|------------|--------|--------|--------|-------------------|
| A          | 1,5    | 6      | 1,5    | $0,540 \pm 0,017$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,542 \pm 0,013$ |
|            |        | 12     | 1,5    | $0,532 \pm 0,012$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,537 \pm 0,019$ |
|            | 3,0    | 6      | 1,5    | $0,543 \pm 0,020$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,545 \pm 0,024$ |
|            |        | 12     | 1,5    | $0,538 \pm 0,018$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,540 \pm 0,023$ |
| B          | 3,0    | 6      | 1,5    | $0,541 \pm 0,016$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,550 \pm 0,027$ |
|            |        | 12     | 1,5    | $0,532 \pm 0,018$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,540 \pm 0,017$ |
| C          | 3,0    | 6      | 1,5    | $0,536 \pm 0,026$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,544 \pm 0,017$ |
|            |        | 12     | 1,5    | $0,530 \pm 0,025$ |
|            |        |        | 3,0    | $0,533 \pm 0,021$ |
| F          | –      | –      | –      | $0,505 \pm 0,019$ |

## 5.2 Studie prostupu světla skleněnými vzorky

### 5.2.1 Princip měření světelné propustnosti skla

Prostup světla sklem, vyjádřený činitelem prostupu světla  $\tau$  [-], byl stanoven dle normy ČSN 36 0011-2. Nejprve byla pomocí luxmetru Voltcraft MS-1300 změřena intenzita dopadajícího světla (osvětlenost) bez vloženého skla  $E_i$  [lx] a poté byla změřena intenzita světla s vloženým vzorkem skla  $E_\tau$  [lx].



Obr. 7 Princip měření propustnosti světla skleněných vzorků na základě intenzity dopadajícího světla (a) a intenzity světla za zkoušeným vzorkem skla (b)

Hodnota činitele prostupu světla je rovna podílu obou naměřených osvětleností:

$$\tau = \frac{E_{\tau}}{E_i} \quad (12)$$

Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot koeficientu propustnosti světla byla měření prováděna ve stínu v letních měsících, za jasné oblohy. Každé měření se opakovalo desetkrát při okolní teplotě 28 °C.

### 5.2.2 Výsledky měření propustnosti světla testovaných skel

V tabulce 3 jsou vyhodnoceny aritmetické průměry činitele prostupu světla  $\tau$  [-] spolu s nejistotami měření.

Tab. 3 Výsledky měření propustnosti světla zkoumaných skel

| Označení vzorku | Název vzorku                        | Tloušťka (mm) | $\tau$ [-]    |
|-----------------|-------------------------------------|---------------|---------------|
| S1              | Základní ploché sklo Float          | 4             | 0,840 ± 0,001 |
| S2              | Základní ploché sklo Float          | 6             | 0,823 ± 0,002 |
| S3              | Sklo s nízkou emisivitou LowE       | 3,8           | 0,762 ± 0,001 |
| S4              | Reflexní bronzové sklo Stopsol      | 3,8           | 0,238 ± 0,001 |
| S5              | Reflexní bronzové sklo Stopsol      | 5,9           | 0,185 ± 0,001 |
| S6              | Dekoratívni sklo s činčilou čirou   | 3,8           | 0,794 ± 0,001 |
| S7              | Dekoratívni sklo s kůrou čirou      | 4,0           | 0,800 ± 0,001 |
| S8              | Drátěné sklo                        | 6,0           | 0,738 ± 0,002 |
| S9              | Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.1 | 6,1           | 0,810 ± 0,002 |
| S10             | Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.2 | 6,6           | 0,804 ± 0,001 |
| S11             | Dvojsklo                            | 24            | 0,668 ± 0,001 |
| S12             | Trojsklo                            | 40            | 0,560 ± 0,001 |

Nižší hodnoty činitele propustnosti světla u vícevrstvých zasklívacích jednotek jsou způsobeny několikanásobnými odrazy světla mezi jednotlivými skleněnými panely, významnou roli však hraje také vrstva stříbra a oxidů kovů nanesená na povrchu skla, což se projevilo již při testování samotného skla LowE. Nejnížší propustnosti světla byly zjištěny u vzorků reflexních bronzových skel Stopsol v důsledku probarvení a tenké vrstvy oxidu ciničitého na jejich povrchu.

### 5.3 Studie propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou

Experimentální měření prostupu světla testovaných polymerních kompozitů byla provedena pomocí stejné metody dle normy ČSN 36 0011-2 a také pomocí stejného měřicího přístroje digitálního luxmetru Voltcraft MS-1300 jako v případě měření světelné propustnosti lehkého aktivního skla. Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot koeficientu propustnosti světla byla měření prováděna ve stínu v letních měsících, za jasné oblohy. Každé měření bylo opakováno dvacetkrát při okolní teplotě 25 °C. Následně byly vyhodnoceny aritmetické průměry a směrodatné odchylky koeficientu propustnosti světla.

#### 5.3.1 Výsledky měření propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou

Prostup světla byl experimentálně stanoven pro kompozity EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna. Veličina  $W_r$  [hmotn. %] vyjadřuje koncentraci naplnění vzorků ovčí vlnou.

Tab. 4 Činitel prostupu světla  $\tau$  [-] kompozitů EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna

| Typ materiálu | $W_r$ [hmotn. %] | $\tau$ [-]      |
|---------------|------------------|-----------------|
| EP            | 0                | $0,69 \pm 0,03$ |
|               | 3                | $0,43 \pm 0,02$ |
|               | 5                | $0,37 \pm 0,02$ |
| PES           | 0                | $0,72 \pm 0,04$ |
|               | 3                | $0,58 \pm 0,03$ |
|               | 5                | $0,53 \pm 0,03$ |

Tato studie prokázala, že vlákna ovčí vlny významně snížila propustnost světla testovaných transparentních kompozitů epoxid/ovčí vlna a polyester/ovčí vlna. Prostup světla testovaných polymerních kompozitů významně klesal se zvyšující se koncentrací ovčí vlny.

### 5.4 Studie vlivu parametrů 3D tisku na prostup světla

Prostup světla testovaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem byl také testován pomocí metody dle normy ČSN 36 0011-2 včetně použití digitálního luxmetru Voltcraft MS-1300. Měření byla prováděna během léta, kolem poledne, ve stínu pod jasnou oblohou.

Zkušební vzorky měly rozměry 60 mm × 60 mm × 2 mm (délka × šířka × tloušťka). Každé měření bylo opakováno dvacetkrát při okolní teplotě 24 °C.

#### 5.4.1 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů

Hodnoty prostupu světla vyjádřené činitelem prostupu světla  $\tau$  [-] jsou uváděny spolu se směrodatnými odchylkami v tabulce 5.

Tab. 5 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů

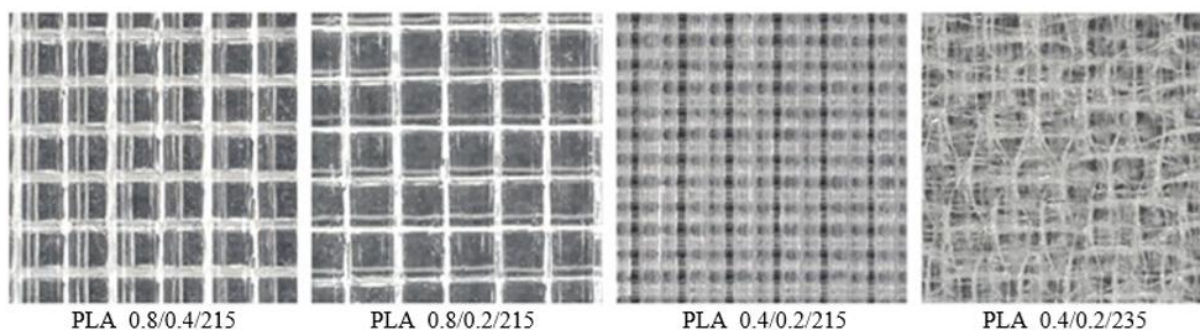
| Označení vzorku  | $\tau$ [-]  |
|------------------|-------------|
| PLA 0,8/0,4/215  | 0,67 ± 0,02 |
| PLA 0,8/0,2/215  | 0,66 ± 0,02 |
| PLA 0,4/0,2/215  | 0,52 ± 0,02 |
| PLA 0,4/0,2/235  | 0,64 ± 0,02 |
| PMMA 0,8/0,4/240 | 0,78 ± 0,03 |
| PMMA 0,8/0,2/240 | 0,74 ± 0,03 |
| PMMA 0,4/0,2/240 | 0,54 ± 0,02 |
| PMMA 0,4/0,2/260 | 0,58 ± 0,02 |
| PETG 0,8/0,4/240 | 0,65 ± 0,02 |
| PETG 0,8/0,2/240 | 0,59 ± 0,02 |
| PETG 0,4/0,2/240 | 0,37 ± 0,01 |
| PETG 0,4/0,2/260 | 0,44 ± 0,01 |

U testovaných 3D tištěných vzorků se činitel prostupu světla  $\tau$  [-] zvyšoval v souvislosti s větším průměrem trysky  $D$  [mm] a vyšší vrstvou  $H$  [mm], což platilo u všech typů materiálu. Použité podmínky při procesu 3D tisku měly výrazný vliv na tvar povrchu a strukturu zkoumaných vzorků. Větší průměr trysky a také větší výška vrstvy vedly ke zvýšení povrchových nerovností 3D tištěných vzorků, což se projevilo zlepšením propustnosti světla. U vzorků vyrobených s průměrem trysky  $D = 0,4$  mm a výškou vrstvy  $H = 0,2$  mm vedlo zvýšení teploty tisku rovněž ke zlepšení propustnosti světla. Lepší spojení vrstev se zde projevilo snížením počtu mikroskopických mezer a nepřesností. Homogennější struktura materiálu způsobená zvýšením teploty 3D tisku tak zlepšuje prostup světla. Hodnoty prostupu světla vyjádřené činitelem prostupu světla  $\tau$  [-] byly v souladu s tvary a strukturami materiálu zachycenými na mikroskopických snímcích 3D tištěných vzorků.

### 5.4.2 Mikroskopická analýza vzorků polymerů vyrobených 3D tiskem

Kromě měření prostupu světla byla také provedena mikroskopická analýza vzorků, která měla ozřejmit souvislost mezi tvarem i strukturou povrchu polymerních vzorků a jejich světelnými vlastnostmi. Pro analýzu povrchu 3D tištěných vzorků a mikrotomových řezů byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-7100 (Keyence Corporation, Osaka, Japonsko). Mikrotomové řezy byly připraveny pomocí rotačního mikrotomu Leica RM2255 o tloušťce 40 mikronů (Leica Microsystems, Wetzlar, Německo). Mikroskopická analýza byla provedena při zvětšení 80×.

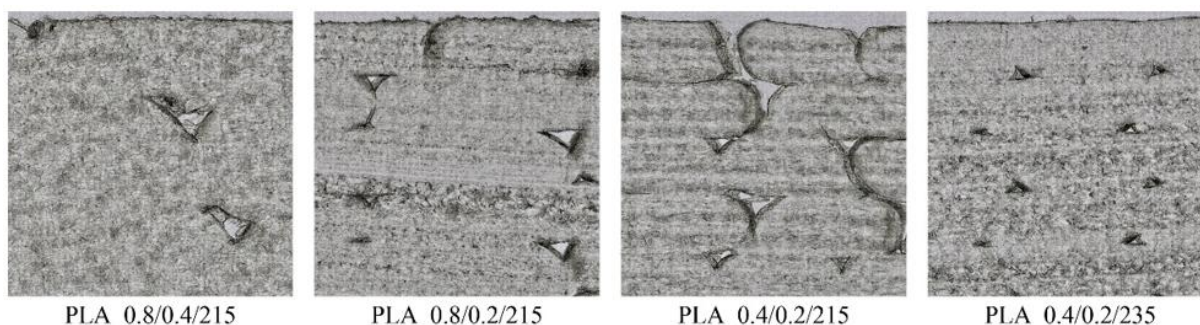
Tvary povrchů 3D tištěných vzorků PLA, vyrobených různými průměry trysek, výškami vrstev a teplotami tisku, jsou znázorněny na mikroskopických snímcích s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm na obrázku 8. Na těchto snímcích je patrné střídavé ukládání jednotlivých vrstev během 3D tisku se vzájemným pootočením jednotlivých vrstev o 90 stupňů. Z těchto snímků je rovněž patrné, jak podmínky 3D tisku ovlivnily tvar i strukturu povrchu polymerních vzorků, což se také projevuje na světelných vlastnostech.



Obrázek 8 Mikroskopické snímky povrchových tvarů zkoumaných PLA vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm

Pro účely hlubšího mikroskopického zkoumání vzorků 3D tištěných polymerů byly vytvořeny sekce mikrotomů. Mikroskopické snímky těchto strukturálních řezů jsou znázorněny na obrázku 9. Vyšší přítomnost vnitřních dutin vykazovaly vzorky s menší výškou vrstvy. Tenčí vrstvy materiálu se tedy nemusí spojit efektivně a dochází tak ke zvýšené tvorbě dutin. Větší průměry trysek a silnější vrstvy měly za následek větší rozměry vnitřních dutin u vyrobených vzorků, ale celkové množství dutin bylo nižší než u vzorků s tenčími vrstvami a menším průměrem trysky. Větší průměr trysky a silnější vrstva tedy snižují množství dutin. Zlepšená přilnavost vrstev byla pozorována při zvýšené teplotě tisku, silnější tiskové vrstvě a větším průměru trysky.

Při stejném průměru trysky a stejné výšce vrstvy mělo zvýšení teploty tisku pozitivní vliv na přilnavost vrstev a zároveň se také snížil celkový počet vnitřních dutin.



PLA 0.8/0.4/215      PLA 0.8/0.2/215      PLA 0.4/0.2/215      PLA 0.4/0.2/235

Obrázek 9 Mikroskopické snímky strukturních řezů zkoumaných PLA vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 1 mm × 1 mm

## 5.5 Matematické simulace kvality denního osvětlení

### 5.5.1 Simulace kvality denního osvětlení pro vzorky skla

Matematické simulace činitele denní osvětlenosti v referenční místnosti byly provedeny pomocí softwaru Wdls 5.0.

Tab. 6 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti u testovaných skel

| Název vzorku            | $\tau$ [-]    | $D_{min}$ [%] | $D_m$ [%] | $D_{max}$ [%] |
|-------------------------|---------------|---------------|-----------|---------------|
| Float tl. 4 mm          | 0,840 ± 0,001 | 1,1           | 3,3       | 14,3          |
| Float tl. 6 mm          | 0,823 ± 0,002 | 1,0           | 3,2       | 14,0          |
| LowE tl. 3,8 mm         | 0,762 ± 0,001 | 1,0           | 3,0       | 13,0          |
| Stopsol tl. 3,8 mm      | 0,238 ± 0,001 | 0,3           | 0,9       | 4,1           |
| Stopsol tl. 5,9 mm      | 0,185 ± 0,001 | 0,2           | 0,7       | 3,2           |
| Činčila čirá tl. 3,8 mm | 0,794 ± 0,001 | 1,0           | 3,1       | 13,5          |
| Kůra čirá tl. 4 mm      | 0,800 ± 0,001 | 1,0           | 3,1       | 13,6          |
| Drátěné sklo tl. 6 mm   | 0,738 ± 0,002 | 0,9           | 2,9       | 12,6          |
| VSG 33.1 tl. 6,1 mm     | 0,810 ± 0,002 | 1,0           | 3,2       | 13,8          |
| VSG 33.2 tl. 6,6 mm     | 0,804 ± 0,001 | 1,0           | 3,2       | 13,7          |
| Dvojsklo tl. 24 mm      | 0,668 ± 0,001 | 0,8           | 2,6       | 11,4          |
| Trojsklo tl. 40 mm      | 0,560 ± 0,001 | 0,7           | 2,2       | 9,5           |

Z výsledků simulací je zřejmé, že hodnoty činitele denní osvětlenosti v daném místě obecně klesaly spolu s klesajícím činitelem prostupu světla.

### 5.5.2 Simulace kvality denního osvětlení pro polymerní kompozity

Pomocí softwaru Wdls 5.0 byl také matematicky simulován vliv prostupu světla testovanými polymerními kompozity plněnými ovčími vlákny na kvalitu denního světla v referenční místnosti, která měla při simulaci jiné parametry než v případě skleněných vzorků. Hodnocen byl v tomto případě vliv koncentrace ovčí vlny.

Tab. 7 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti v referenční místnosti pro testované vzorky kompozitu

| Typ materiálu | $W_r$<br>[hm. %] | $\tau$ [-]      | $D_{min}$<br>[%] | $D_m$<br>[%] | $D_{max}$<br>[%] |
|---------------|------------------|-----------------|------------------|--------------|------------------|
| EP            | 0                | $0,69 \pm 0,03$ | 1,5              | 4,4          | 8,8              |
|               | 3                | $0,43 \pm 0,02$ | 0,9              | 2,7          | 5,3              |
|               | 5                | $0,37 \pm 0,02$ | 0,8              | 2,3          | 4,5              |
| PES           | 0                | $0,72 \pm 0,04$ | 1,4              | 4,3          | 8,5              |
|               | 3                | $0,58 \pm 0,03$ | 1,2              | 3,6          | 7,1              |
|               | 5                | $0,53 \pm 0,03$ | 1,1              | 3,3          | 6,5              |

Z výsledků simulací je zřejmé, že osvětlenost vyjádřená hodnotou činitele denního osvětlení v daném bodě klesala spolu s poklesem činitele prostupu světla. To bylo dáno zvýšením koncentrace ovčí vlny v testovaných kompozitech polymer/ovčí vlna. S rostoucí koncentrací ovčí vlny klesá průstup světla kompozitem a následně klesá i osvětlenost místnosti.

### 5.5.3 Simulace vlivu odraznosti ploch na denní osvětlenost

Ve dvou simulacích byl zkoumán také vliv změny odraznosti, tedy činitele odrazu světla  $\rho$  [-] povrchů stěn a stropu, na denní osvětlenost místnosti. Srovnání výsledků obou simulací je znázorněno v tabulce 8.

Tab. 8 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti referenční místnosti při různých hodnotách činitele odrazu stěn a stropu

| Stěny $\rho$ [-] | Strop $\rho$ [-] | $D_{min}$<br>[%] | $D_m$<br>[%] | $D_{max}$<br>[%] |
|------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|
| 0,3              | 0,75             | 1,2              | 3,1          | 10               |
| 0,9              | 0,9              | 3,0              | 5,9          | 10               |

Srovnání výsledků simulací ukázalo, jakým způsobem ovlivňuje změna odraznosti stropu a stěn hodnotu činitele denní osvětlenosti  $D$  [%] v referenční místnosti. Je zřejmé, že díky vyšší odraznosti stěn a stropů lze dosáhnout vyšší osvětlenosti.

## 6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

V této práci byla testována široká škála materiálů, zhotovených odlišnými technologiemi výroby, a to se zaměřením na světelně technické vlastnosti, jakými jsou světelná propustnost, odraz a pohlcování světla. Předkládané výsledky práce lze shrnout do následujících bodů:

- Zpracoval jsem přehled světelných vlastností běžně používaných výplní oken a dveří. Provedl jsem sérii měření a výpočtů, které umožnili vzájemné porovnání propustnosti světla skleněných materiálů při stejných podmínkách.
- Vyhodnotil jsem různé faktory ovlivňující prostup světla skleněnými materiály jako jsou zbarvení, tvar povrchu, tloušťka, vícevrstvnost atd.
- Ověřil jsem možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s důrazem na schopnosti pohlcování nežádoucího světla.
- Prozkoumal jsem vliv geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných materiálů.
- Otestoval jsem vliv změny parametrů 3D tisku na prostup světla transparentních polymerních materiálů. Prokázal jsem, že parametry 3D tisku jako jsou průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku mají významný vliv na prostup světla.

- Ověřil jsem možnosti využití kompozitů polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelně aktivní izolační materiály.
- Prozkoumal jsem vliv koncentrace ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích na prostup světla.
- Pomocí programu WDLS jsem provedl sérii simulací, na nichž jsem názorně ilustroval, jak činitel prostupu světla osvětlovacími otvory a také činitel odrazu světla od světelně činných materiálů ovlivňují osvětlenost místnosti.

Z výsledků této práce mohou těžit nejen projektanti či technologové, ale i zájemci z řad veřejnosti. Za všechny je možné jmenovat:

- Projektanti i veřejnost se mohou seznámit nejen se světelnými vlastnostmi dosud běžně používaných skleněných výplní oken a dveří, ale také s novými polymerními materiály, které mohou být pro tyto účely používány.
- Projektanti mají možnost využít předložené údaje o prostupu světla a mohou se navíc seznámit se skutečným složením dvojskel a trojskel i s technologií jejich výroby. Zpřesnění vstupních dat do výpočetních programů a matematických simulací pomůže zlepšit dosud nevyhovující kvalitu denního osvětlení nejen ve školách, ale také v obytných místnostech.
- Projektanti, stavebníci i široká veřejnost mohou při návrhu interiérů využít předložených poznatků o schopnostech materiálů odrážet či pohlcovat světlo a tím předcházet riziku nežádoucího oslnění.
- Matematické simulace provedené v této práci ukazují i zájemcům z řad veřejnosti vliv prostupu a odrazu světla na kvalitu denního osvětlení v místnosti. Osvojené znalosti umožňují správně navrhnout nejen osvětlovací otvory, ale i provedení a rozvržení interiéru dle konkrétních potřeb uživatelů. Těmito opatřeními lze výrazně zvýšit zrakovou pohodu a kvalitu života.

- Projektanti, stavebníci, chovatelé ovcí a ekologové mohou využít odpadní ovčí vlnu k výrobě kompozitů na bázi polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace jako jsou světelně činné izolační materiály.
- Technologové výroby mohou úspěšně optimalizovat parametry 3D tisku, jako jsou průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku, pro dosažení požadovaných výsledků a zlepšení kvality výrobků.

Úkolem do budoucna je zkoumat u polymerů vyrobených technologií 3D tisku vliv dodatečného tepelného zpracování na světelně technické vlastnosti.

## 7. ZÁVĚR

Tato práce vznikla především jako reakce na nedostatek informací o světelně technických vlastnostech materiálů podílejících se na šíření světla v interiéru. U zkoumaných materiálů byly v minulosti zmapovány především mechanické či tepelně izolační vlastnosti, ale jejich světelně technické vlastnosti byli až dosud opomíjeny. Všechny tyto materiály se přitom podílejí, nebo se díky svým unikátním vlastnostem mohou úspěšně podílet, na přenosu a distribuci světla v interiéru. Jelikož světelně technické vlastnosti těchto materiálů nebyli dosud řádně prozkoumány či ověřeny, nemohli být ani správně zahrnuti v matematických simulacích používaných projektanty při návrhu budov. Z této práce navíc vyplývá, že pro osvětlovací otvory lze použít i nové a netradiční materiály, jejichž použití umožňují ověřené mechanické či tepelně izolační vlastnosti a nyní i nově otestované vlastnosti světelně technické.

Odraz a pohltivost světla materiálů stojí většinou na okraji zájmu běžného uživatele. Při výběru barev a povrchu stěn či nábytku v interiéru jsou málokdy zohledněny jejich světelné vlastnosti. Odrazu a pohltivosti světla je přitom nutné věnovat zvýšenou pozornost, neboť spolu s prostupností světla významně ovlivňují zrakovou pohodu člověka.

Popularita technologie 3D tisku s sebou přináší také potřebu zkoumat vliv podmínek 3D tisku na fyzikální a mechanické vlastnosti výrobků. Světelně technickým vlastnostem však nebyla dosud věnována odpovídající pozornost. Bylo již prokázáno, že parametry 3D tisku jako průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku mají nesporný vliv na mechanické vlastnosti, v této práci však bylo ověřeno, že uvedené parametry mají vliv také na prostup světla.

## Seznam použité literatury

1. Skleněné materiály. Dostupné z: <https://sklenarstvinonstop.cz>
2. Skleněné materiály. Dostupné z: [srovnani-dvojsklo-vs-trojtklo\\_4.pdf \(saint-gobain-glass.cz\)](#)
3. LABUDEK, Jiří; MICHNOVÁ, Lenka. Empirický nástroj pro předběžný návrh potřebné plochy okna na splnění normových požadavků pro vnitřní osvětlení obytných místností. Online. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*. 2011, roč. 11, č. 1, s. 255-262. ISSN 1213-1962. Dostupné také z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89833>
4. ČERMÁK, Miroslav. Denní osvětlení ve školách podle ČSN EN 17037. *SVĚTLO. Praha: FCC Public, 2020, 23: 4-5*. Dostupné také z: <https://www.udrzitelne-projekty.cz/05-odborne-clanky/Denni%20osvteleni%20ve%20skolach.pdf>
5. BÁLSKÝ, M., Analýza procesu mnohonásobných odrazů. (Disertační práce). ČVUT v Praze 2014. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/60866/Disertace\\_Balsky\\_2014.pdf?sequence=1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/60866/Disertace_Balsky_2014.pdf?sequence=1)
6. Environmentální fyzika. Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB. Dostupné z: <[http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env\\_fyzika](http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika)>

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 Zkoumané vzorky skla: Základní čiré sklo Float (a), sklo s nízkou emisivitou LowE (b), reflexní bronzové sklo Stopsol (c), dekorativní sklo s čirou činčilou (d), a čirou kůrou (e), drátěné sklo (f), vrstvené sklo (g), dvojsklo (h), trojsklo (i)..... | 14 |
| Obr. 2 Zkoumané tvary otvorů (jejich řezy): A – válec/hranol, B - komolý kužel/komolý čtvercový jehlan, C – kužel/čtvercový jehlan.....  | 15 |
| Obr. 3 Rozměry vzorků s kruhovými otvory pro experimentální měření vlastností absorpce světla.....   | 15 |
| Obr. 4 Mikroskopické struktury vláken ovčí vlny: (a) před procesem mletí; (b) po procesu mletí. ....   | 16 |
| Obr. 5 Fotografie zkoumaných vzorků polymerů s různými koncentracemi ovčí vlny $W_r$ (v hmotn. %): (a) EP vzorky; (b) PU vzorky; (c) PES vzorky. ....  | 16 |
| Obr. 6 Schéma nanášení vrstev během výroby vzorků 3D tiskem .....  | 17 |
| Obr. 7 Princip měření propustnosti světla skleněných vzorků na základě intenzity dopadajícího světla (a) a intenzity světla za zkoušeným vzorkem skla (b).....   | 20 |
| Obr. 8 Mikroskopické snímky povrchových tvarů zkoumaných PLA vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm .....   | 24 |
| Obr. 9 Mikroskopické snímky strukturních řezů zkoumaných PLA vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 1 mm × 1 mm .....   | 25 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků s kruhovými otvory.....   | 19 |
| Tab. 2 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků se čtvercovými otvory.....  | 20 |
| Tab. 3 Výsledky měření propustnosti světla zkoumaných skel... ..  | 21 |
| Tab. 4 Činitel prostupu světla $\tau$ [-] kompozitů EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna...22   |    |
| Tab. 5 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů... ..  | 23 |
| Tab. 6 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti u testovaných skel... ..  | 25 |
| Tab. 7 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti v referenční místnosti pro testované vzorky kompozitu.....                    | 26 |
| Tab. 8 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti referenční místnosti při různých hodnotách činitele odrazu stěn a stropu..... | 27 |

## Seznam použitých symbolů a zkratek

|               |                         |  |
|---------------|-------------------------|--|
| $S$           | [m <sup>2</sup> ]       | Plocha.  |
| $\phi$        | [lm]                    | Světelný tok dopadající.                         |
| $\phi_\rho$   | [lm]                    | Světelný tok odražený.                           |
| $\phi_\alpha$ | [lm]                    | Světelný tok pohlcený.                           |
| $\phi_\tau$   | [lm]                    | Světelný tok, který prošel přes látku.           |
| $E$           | [lx]                    | Osvětlenost (nebo také intenzita osvětlení).     |
| $\bar{E}_m$   | [lx]                    | Udržovaná osvětlenost.                           |
| $E_h$         | [lx]                    | Osvětlenost venkovní nestíněné vodorovné roviny. |
| $E_\tau$      | [lx]                    | Osvětlenost naměřená za sklem.                   |
| $E_i$         | [lx]                    | Osvětlenost naměřená bez skla.                   |
| $D$           | [%]                     | Činitel denní osvětlenosti.                      |
| $D_{min}$     | [%]                     | Minimální hodnota činitele denní osvětlenosti.   |
| $D_{max}$     | [%]                     | Maximální hodnota činitele denní osvětlenosti.   |
| $r$           | [-]                     | Rovnoměrnost denního osvětlení.                  |
| $\rho$        | [-]                     | Činitel odrazu světla.                           |
| $\alpha$      | [-]                     | Činitel pohltivosti světla.                      |
| $\tau$        | [-]                     | Činitel prostupu světla.                         |
| $T$           | [°C]                    | Teplota.   |
| $v$           | [mm · s <sup>-1</sup> ] | Rychlost tisku.                                  |
| $p$           | [mm]                    | Rozteč otvorů.                                   |
| $h$           | [mm]                    | Hloubka otvoru.                                  |
| $t$           | [mm]                    | Tloušťka.  |
| $d$           | [μm]                    | Průměr vlákna.                                   |
| $d$           | [mm]                    | Průměr filamentu.                                |
| $D$           | [mm]                    | Průměr trysky.                                   |
| $H$           | [mm]                    | Výška vrstvy.                                    |
| $W_r$         | [hmotn. %]              | Koncentrace naplnění vzorků ovčí vlnou.          |

## Publikační aktivity autora

1. NEVŘELA, M.; VAŠINA, M.; HRBÁČEK, P.; DEKYS, V. Effect of geometry and surface distribution of holes on sound and light absorption properties of 3D-printed PETG materials. *MM Science Journal*. 2023. Dostupné také z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/october-2023/articles/effect-of-geometry-and-surface-distribution-of-holes-on-sound-and-light-absorption-properties-of-3d-printed-petg-materials>

Ocenění článku: Čestná cena Inženýrské akademie ČR za nejlepší příspěvek *MM Science Journal* v akademickém roce 2023/2024.

2. HRBÁČEK, P.; VAŠINA, M. Study of light transmission and noise attenuation properties of light active glass materials. *Manufacturing Technology*. 2022, vol. 22, iss. 5, s. 542-549. ISSN 1213-2489. Dostupné z: <https://journalmt.com/pdfs/mft/2022/05/02.pdf>.
3. VAŠINA, M.; STRÁŽNICKÝ, P.; HRBÁČEK, P.; RUSNÁKOVÁ, S.; BOSÁK, O.; KUBLIHA, M. Investigation of Physical Properties of Polymer Composites Filled with Sheep Wool. *Polymers*. 2024, 16.5: 690. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/5/690>
4. BENÍČEK, L.; VAŠINA, M.; HRBÁČEK, P. Influence of 3D Printing Conditions on Physical–Mechanical Properties of Polymer Materials. *Polymers*. 2025, 17.1: 43. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/1/43>

## Odborný životopis autora

Jméno: Ing. Pavel Hrbáček  
Narozen: 18. 5. 1975 v Prostějově

### Vzdělání

2020 – dosud Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická,  
Ústav fyziky a materiálového inženýrství.  
Doktorský studijní program: Nástroje a procesy  
Téma disertační práce: Vliv technologie výroby materiálů na  
jejich světelně technické vlastnosti.

2018 – 2020 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická,  
Ústav výrobního inženýrství.  
Magisterský studijní program: Procesní inženýrství.  
Studijní obor: Výrobní inženýrství.  
Závěrečná práce: Hydraulické systémy pro zvedání a  
spouštění hmotné zátěže.

Práce získala *Cenu ředitelky Ústavu výrobního inženýrství*.

2014 - 2017 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická,  
Ústav výrobního inženýrství.  
Bakalářský studijní program: Procesní inženýrství.  
Studijní obor: Technologická zařízení.  
Závěrečná práce: Zvukově izolační a světelné vlastnosti  
okenních a dveřních výplní.

1992 - 1994 SOU strojírenské Prostějov,  
Studijní obor: Strojírenství (maturitní zkouška).

1989 - 1992 SOU strojírenské Prostějov,  
Učební obor: Strojní mechanik (učňovská zkouška).

### Zahraniční stáž

2023 (leden – únor) DT – Slovenská výhybkáreň, s.r.o.  
Nové Mesto nad Váhom, Slovensko.

Ing. Pavel Hrbáček, Ph.D.

**Vliv technologie výroby materiálů na jejich světelně technické  
vlastnosti**

The influence of material production technology on their light-technical  
properties

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2025

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-343-0

