

Vhodnost vybraných 3D tiskových filamentů pro použití v restaurování

Suitability of Selected 3D Printing Materials for Conservation Purposes

Šárka Vyhnánková

Klíčová slova:

3D tisk | FDM technologie | restaurování | sádra | PLA | PETG | ABS | PMMA | VOC | FTIR | kompatibilita materiálů

Keywords:

3D tisk | FDM technology | conservation | plaster | PLA | PETG | ABS | PMMA | VOC emissions | material compatibility

Výzkum se zaměřuje na posouzení vhodnosti vybraných filamentů používaných při 3D tisku (PLA, PETG, ABS a PMMA) pro využití v restaurování sádrových děl. Cílem bylo experimentálně ověřit jejich chemickou a fyzikální kompatibilitu se sádrou, která představuje citlivý materiál v sochařské tvorbě i konzervátorské praxi. Východiskem práce je zjištění, že současná literatura se zaměřuje převážně na technologické aspekty 3D tisku, zatímco otázky interakce polymerů s originálními materiály uměleckých děl zůstávají dosud nedostatečně prozkoumány.

Výzkum probíhal na standardizovaných vzorcích připravených ze sádry a čtyř typů polymerních filamentů. Testování zahrnovalo Fourierovu infračervenou spektroskopii (FTIR), kolorimetrii (ΔE), rastrovací elektronovou mikroskopii (SEM/SEI), ruční rentgenovou fluorescenční spektroskopii (XRF) a tzv. cross-infection test sledující vliv těkavých organických látek (VOC) na celulózu. Součástí zkoumání bylo i umělé teplo-vlhké stárnutí vzorků.

Tato práce představuje první ucelený výzkum v České republice, který se zabývá kompatibilitou FDM polymerů s materiály kulturního dědictví. I ve světovém kontextu jde o téma, kterému se dosud věnuje jen omezený počet studií, přičemž každá sleduje jiný typ uměleckého materiálu. Výsledky proto dosud neumožňují jednotně definovat konzervátorsky vhodný, reverzibilní a chemicky stabilní polymer pro široké spektrum sochařských děl. Tento výzkum tak přispívá k formování základního poznání materiálového chování FDM polymerů v kontaktu s historickými materiály sochařských děl.

Výsledky ukázaly, že žádný z testovaných materiálů není univerzálně vhodný. Z hlediska chemické stability, emisí a kompatibility se sádrou se jako nejvhodnější jeví PMMA a PETG, zatímco PLA je pro konzervátorské účely nevhodné. Práce přináší podložená data pro výběr 3D tiskových materiálů v praxi, upozorňuje na nutnost standardizace testovacích metod a formuluje doporučení pro bezpečné používání polymerních materiálů v památkové péči.

Research focuses on assessing the suitability of selected 3D printing filaments (PLA, PETG, ABS and PMMA) for use in the conservation and restoration of plaster artworks. The aim was to experimentally evaluate their chemical and physical compatibility with plaster — a sensitive material in both sculptural creation and conservation practice. The study originates from the observation that current literature concentrates mainly on the technological aspects of 3D printing, while the long-term stability of polymers remain insufficiently explored.

The research was carried out on standardised samples prepared from plaster and four types of polymer filaments. The analytical methods employed included Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), colourimetry (ΔE), scanning electron microscopy (SEM/SEI), handheld X-ray fluorescence (XRF) and a cross-infection test monitoring the influence of volatile organic compounds (VOCs) on cellulose. The study also incorporated artificial heat-humidity ageing.

This work represents the first comprehensive research in the Czech Republic devoted to the compatibility of FDM polymers with cultural heritage materials. Even in the global context, only a limited number of studies have addressed this topic, each focusing on a different type of artistic substrate. The current state of research therefore does not yet allow the unified identification of a conservation-grade, reversible and chemically stable polymer suitable for the diverse field of sculpture conservation. This study thus contributes to establishing fundamental knowledge about the material behaviour of FDM polymers in contact with historical sculptural materials.

The results showed that none of the tested materials are universally suitable. In terms of chemical stability, emissions and compatibility with plaster, PMMA and PETG proved to be the most appropriate, while PLA is unsuitable for conservation purposes. The research provides evidence-based data to support the selection of 3D printing materials in practice, highlights the need for standardised testing methodologies, and formulates recommendations for the safe application of polymeric materials in cultural heritage preservation.

Úvod

Aditivní výroba, zejména technologie Fused Deposition Modeling (FDM), se v posledním desetiletí stala běžnou součástí restaurátorské praxe v oblasti sochařských děl a architektonických prvků. 3D tisk je využíván při rekonstrukci chybějících částí, výrobě podpurných konstrukcí, forem, pracovních modelů i prezentačních replik (BALLETTI, BALLARIN, GUERRA, 2017; SCOPIGNO et al., 2017). Jeho rozšíření je dáno především technologickou dostupností, relativně nízkými náklady a možností přesného tvarového přizpůsobení konkrétnímu artefaktu.

Zatímco digitální dokumentace a výroba replik bývají vnímány jako relativně bezpečné aplikace, přímé nebo dlouhodobé použití 3D tištěných polymerních materiálů v kontaktu s originálním uměleckým dílem představuje zcela odlišnou kategorii zásahu. V tomto kontextu se dostává do popředí otázka chemické a fyzikální kompatibility použitých materiálů, jejich dlouhodobé stability a možných vedlejších účinků, které mohou ohrozit autenticitu a dochovaný stav díla. Tyto aspekty byly v českém prostředí dosud reflektovány především na úrovni případových studií a eticko-technické reflexe konkrétních zásahů (ĎOUBAL, VYHNÁNKOVÁ, REJMAN, 2025), zatímco systematická experimentální data k materiálové kompatibilitě polymerů se sádro dosud chyběla.

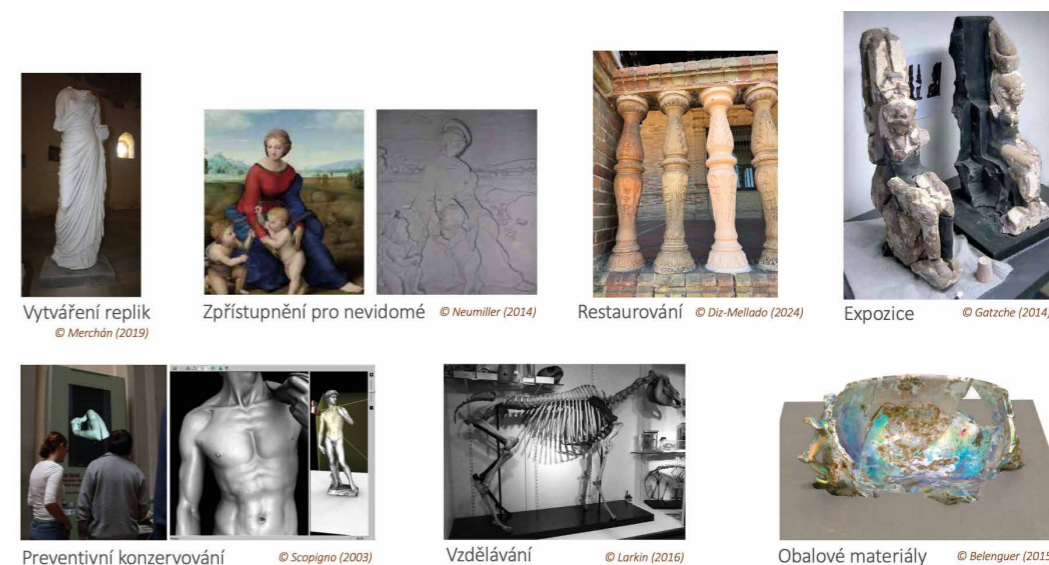
Sádra je materiálem, který byl v minulosti hojně využíván nejen jako finální sochařský materiál, ale také pro tvorbu modelů, studijních odlitků a architektonických dekorací. Navzdory své historické a umělecké hodnotě bývá v restaurátorské praxi často podceňována, a to zejména z hlediska materiálové citlivosti. Sádra je vysoce hygroskopická, mechanicky křehká a náchylná k chemickým interakcím, což z ní činí materiál mimořádně zranitelný při kontaktu s nevhodně zvolenými doplňky nebo zásahy (BURKHARDTOVÁ, 2023).

Současná restaurátorská praxe se přitom stále častěji potýká se situacemi, kdy jsou 3D tištěné doplňky aplikovány bez předchozího materiálového testování, často pouze na základě technologické dostupnosti nebo estetického výsledku. Tento přístup s sebou nese riziko nevratných změn, které se mohou projevit až s časovým odstupem. Cílem této studie je proto přispět k objektivnímu posouzení vhodnosti vybraných FDM filamentů pro použití v restaurování sádrových děl na základě experimentálních dat.

Stav poznání a vymezení výzkumné mezery

Výzkum zaměřený na využití 3D tisku v oblasti kulturního dědictví se v posledních letech dynamicky rozvíjí. Převážná část publikovaných studií se však soustředí na technologické aspekty aditivní výroby, zejména na tiskové parametry, mechanické vlastnosti výtisků a optimalizaci výrobních procesů, typicky v průmyslovém a inženýrském kontextu (NGO et al., 2018; YILMAZ, 2021). Typickým příkladem tohoto přístupu jsou studie zaměřené na optimalizaci tiskových parametrů a mechanických vlastností polymerních výtisků, zejména u PLA, kde je pozornost věnována vlivu teploty trysky, struktury tisku a výsledné pevnosti materiálu (NGO et al., 2018; RIVERA-LÓPEZ et al., 2024). Tyto práce však zpravidla nereflktují dlouhodobé chemické chování polymerů ani jejich interakci s citlivými historickými materiály. V kontextu památkové péče je 3D tisk nejčastěji prezentován jako nástroj pro dokumentaci, digitalizaci a výrobu replik, přičemž otázky dlouhodobé materiálové kompatibility zůstávají spíše na okraji zájmu (REMONDINO & RIZZI, 2010). (Obr. 1)

Studie, které se zabývají chemickým chováním polymerních materiálů, se zpravidla zaměřují na průmyslové nebo designérské aplikace, kde je kladen důraz na mechanickou pevnost, pružnost či odolnost vůči teplotě. Tyto parametry však nejsou pro restaurátorskou praxi rozhodující. Z pohledu konzervace je zásadní především stabilita materiálu v čase a jeho interakce s okolními materiály (DERRICK, STULIK, LANDRY, 1999), stejně jako případná emise těkavých organických látek (VOC), které mohou negativně ovlivnit citlivé substráty (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).



Obr. 1 Přehled vybraných aplikací 3D tisku v památkové péči a restaurování, ilustrující rozdílné požadavky na materiálové vlastnosti v závislosti na typu zásahu a míře kontaktu s originálním dílem – od replik bez přímého kontaktu přes obalové a podpurné systémy až po funkční doplňky a integrační prvky v interiéru i exteriéru. [Převzato a upraveno podle vybraných případových studií © Merchán et al.; Neumiller; Diz-Mellado; Gatzche, Scopigno; Larkin; Sánchez-Belenguer, 2003–2024.]

V zahraniční literatuře se objevují dílčí studie zaměřené buď na kompatibilitu 3D tištěných polymerů s konkrétními materiály, například keramickými nebo skleněnými artefakty, nebo na hodnocení emisí VOC z vybraných filamentů (CIMINO et al., 2018; AURA-CASTRO et al., 2021). Tyto práce však často sledují pouze jeden analytický přístup a jejich výsledky nelze bez dalšího zobecnit. Chybí systematické studie kombinující více analytických metod a simulující dlouhodobý kontakt polymeru s originálním materiálem.

V českém prostředí dosud nebyl publikován ucelený experimentální výzkum, který by se zaměřoval na kompatibilitu běžně dostupných FDM filamentů se sádro, ale ani jiným sochařským materiálem. Restaurátoři jsou tak při rozhodování o použití 3D tištěných doplňků odkázáni na obecná doporučení nebo zkušenosti z jiných materiálových oblastí, což představuje významnou metodologickou mezeru. Právě tuto mezeru se snaží předložený výzkum adresovat.

Přestože přehledové studie o digitální fabrikaci v oblasti kulturního dědictví detailně mapují dostupné technologie a jejich aplikační potenciál, otázky dlouhodobého materiálového chování a chemické kompatibility použitých polymerů zůstávají spíše implicitní nebo opomíjené (SCOPIGNO et al., 2017).

Cíl výzkumu, výběr materiálů a delimitace studie

Hlavním cílem výzkumu bylo experimentálně posoudit chemickou a fyzikální kompatibilitu vybraných polymerních materiálů používaných při 3D tisku technologií FDM se sádro, a to v kontextu jejich potenciálního využití v restaurátorské praxi. Výzkum byl koncipován jako materiálová studie zaměřená na chování polymerů v přímém a dlouhodobém kontaktu s citlivým anorganickým substrátem, nikoli jako technologická optimalizace tiskových procesů.

Pozornost byla soustředěna na čtyři typy filamentů: PLA (polylactic acid), PETG (polyethylene terephthalate glycol), ABS (acrylonitrile butadiene styrene) a PMMA (polymethyl methacrylate). Tyto materiály byly zvoleny na základě kombinace několika kritérií, která vycházejí mimo jiné z reálné restaurátorské praxe i současného stavu trhu. Jednalo se zejména o jejich běžnou dostupnost, časté používání v oblasti kulturního dědictví nebo příbuzných oborech, transparentnost deklarovaného složení a absenci kompozitních plniv, která by mohla významně ovlivnit výsledky testů (DÍAZ-MARÍN & AURA-CASTRO, 2021; CIMINO et al., 2018).

Při sestavování experimentální metodiky bylo rovněž přihlédnuto k výsledkům rešerše odborné literatury z oborů, v nichž je problematika chemické a fyzikální stability polymerních materiálů dlouhodobě systematicky sledována. Součástí přípravné fáze výzkumu byla rovněž systematická rešerše odborné literatury zaměřené na testování chemické a fyzikální stability polymerních materiálů vyráběných aditivními technologiemi v kontaktu s okolním prostředím. Relevantní studie se v tomto ohledu soustřeďují především do oblasti medicíny, zejména chirurgických aplikací a výroby implantátů, a do oblasti potravinářství, kde jsou dlouhodobě sledovány požadavky na materiálovou inertnost, emisní chování a stárnutí polymerů.

Tyto obory disponují ustálenými metodologickými postupy pro hodnocení materiálové stability, včetně testování chemických změn, mechanického chování, povrchových vlastností a emisí těkavých organických látek (VOC), a to za přísně kontrolovaných podmínek. Závěry těchto studií, ač primárně určené pro jiné aplikační kontexty, poskytly důležitý metodologický rámec pro návrh experimentální části této práce, zejména při volbě analytických metod a interpretačních limitů výsledků (např. DOSTÁLOVÁ et. al., 2018, NADAGOUDA, RASTOGI, GINN, 2020; OBAEED & HAMDAN, 2024).

PLA byl do výzkumu zařazen především proto, že patří mezi nejrozšířenější filameny používané i v amatérské a poloprofesionální praxi a je často mylně považován za „bezpečný“ materiál na základě svého biogenního původu. PETG a ABS představují technické polymery, které jsou běžně používány pro výrobu funkčních dílů a konstrukčních prvků, a jejich materiálové chování v kontextu památkové péče je diskutováno v několika odborných studiích (DÍAZ-MARÍN & AURA-CASTRO, 2017; CIMINO et al., 2018). PMMA byl zařazen jako referenční materiál s historicky doloženým využitím v konzervaci a restaurování, a to navzdory jeho omezenému rozšíření v technologii FDM (SCHUBERTHAN, 2019).



Obr. 2 Schéma experimentálního uspořádání sendvičových vzorků pro hodnocení dlouhodobé interakce polymerů se sádrovou během umělého stárnutí (28 dní, 60 °C, 65 % RH). Referenční sádrové vzorky byly stárnuté odděleně za identických podmínek. [KB, 2025]



Obr. 3 Příprava a měření sádrového vzorku po umělém stárnutí pomocí ATR-FTIR analýzy (Nicolet iZ10, Thermo Scientific). FTIR spektroskopie byla využita k ověření možných chemických změn a přítomnosti degradačních produktů v důsledku kontaktu s polymerními materiály během stárnutí. Měření probíhalo s ATR příslušenstvím a diamantovým krystalem. [ŠV, 2025]

Sádra byla zvolena jako testovací substrát z důvodu své vysoké citlivosti vůči změnám vlhkosti, teploty a chemického prostředí. V porovnání s jinými minerálními materiály, jako je různý typ kamene nebo keramika, vykazuje sádra výrazně vyšší reaktivitu a hygroskopičnost, což z ní činí vhodný modelový materiál pro sledování potenciálních rizik spojených s aplikací polymerních doplňků (BURKHARDTOVÁ, 2023). Zároveň se jedná o materiál, který je v historických sbírkách a památkových fondech zastoupen ve značném množství, a to jak ve formě samostatných sochařských děl, tak modelů a odlitek.

Výzkum byl záměrně delimitován. Nebyly sledovány mechanické vlastnosti tiskových výstupů, adhezni chování lepidel ani vizuální integrace doplňků do konkrétních restaurátorských zásahů. Cílem nebylo hodnotit technologickou vhodnost FDM jako takové, ale výhradně materiálové chování vybraných polymerů v kontaktu se sádrovou. Stejně tak nebyly hodnoceny kompozitní filameny ani materiály s přidavkem pigmentů či plniv, u nichž by bylo obtížné oddělit vliv základního polymeru od vlivu aditiv.

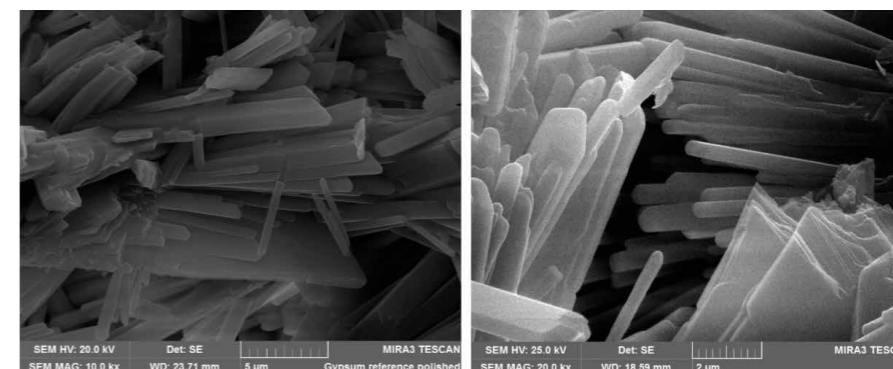
Metodika experimentálního výzkumu

Experimentální metodika byla navržena s cílem postihnout co nejširší spektrum potenciálních interakcí mezi polymerními materiály a sádrovou. Z tohoto důvodu byla zvolena kombinace několika analytických metod, které se vzájemně doplňují a umožňují sledovat jak chemické změny polymerů, tak jejich fyzikální projevy a možné vedlejší účinky v podobě emisí těkavých látek.

Vzorky polymerních filamentů byly vytištěny technologií FDM za kontrolovaných podmínek s důrazem na reprodukovatelnost. Tiskové parametry byly zvoleny tak, aby odpovídaly běžné praxi a nebyly optimalizovány pro extrémní mechanické vlastnosti. Polymerní části byly následně uvedeny do přímého kontaktu se sádrovými tělesy, čímž vznikl modelový systém simulující restaurátorský zásah, při němž polymerní doplněk přiléhá k originálnímu materiálu.

Klíčovou součástí experimentu bylo teplo-vlhké umělé stárnutí (Obr. 2), jehož cílem bylo simulovat dlouhodobé působení zvýšené relativní vlhkosti a teploty. Tento typ stárnutí je v oblasti konzervace běžně používán jako akcelerovaný model procesů, které v reálných podmínkách probíhají po desítky let (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024). Je však nutné zdůraznit, že umělé stárnutí nepředstavuje přesnou predikci chování materiálu v reálném čase, ale slouží k identifikaci potenciálních rizik a trendů.

Fourierova infračervená spektroskopie (FTIR) byla využita k detekci chemických změn polymerních materiálů před a po stárnutí. Tato metoda umožňuje sledovat změny v molekulární struktuře polymerů, například vznik nových funkčních skupin nebo degradaci polymerního řetězce. FTIR je v konzervátorské vědě široce používána pro hodnocení stárnutí syntetických materiálů a jejich degradačních mechanismů (DERRICK, STULIK, LANDRY, 1999). (Obr. 3)



Obr. 4 Porovnání SEM mikrostrukturální analýzy sádry před stárnutím (vlevo) a po urychleném stárnutí v sendvičovém kontaktu s PMMA-1 (vpravo). Zachovaná morfologie krystalů $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bez detekovatelných změn či sekundárních fází indikuje absenci mikromorfologických projevů interakce v rámci sledovaného experimentu. SEM/SEI. [KB, 2025]

Kolorimetrická měření (ΔE) sloužila k objektivnímu hodnocení barevných změn povrchů polymerů. Barevná stabilita je v restaurátorském kontextu zásadní zejména u pohledových doplňků a rekonstrukcí, kde i relativně malé změny mohou vést k vizuální disharmonii zásahu.

Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM/SEI) byla použita k pozorování morfologických změn povrchu polymerů i sádry. Tato metoda umožňuje detekovat mikrotrhliny, změny povrchové struktury a další projevy degradace, které nemusí být patrné pouhým okem. (Obr. 4)

Cross-infection test byl zařazen s cílem sledovat emise těkavých organických látek (VOC) a jejich potenciální vliv na citlivé organické materiály. Tento test, běžně používaný v oblasti preventivní konzervace, umožňuje hodnotit nepřímé riziko, které materiál představuje pro své okolí, a je proto zvláště relevantní pro aplikace v uzavřených depozitárních nebo výstavních prostorách (WOJNOWSKI et al., 2022; WOJTYŁA, KLAMA, BARAN, 2019; KNOTEK, ĐUROVIČ, KUČEROVÁ, 2023), přičemž význam hodnocení emisí VOC z polymerních materiálů v konzervátorském kontextu byl opakovaně diskutován (CIMINO et al., 2018). (Obr. 5)



Obr. 5 Experimentální uspořádání cross-infection testu – polymerní vzorek PMMA-1 uzavřený společně s referenční celulózu (filtrační papír Whatman No. 1) ve skleněné vialce. Vzorky byly hermeticky uzavřeny a uměle stárnuty při 80 °C s cílem sledovat emise těkavých organických látek (VOC) a jejich nepřímý degradační účinek na citlivý organický materiál v uzavřeném mikroprostředí. [ŠV, 2025]

Ruční rentgenová fluorescenční spektroskopie (XRF) byla v rámci výzkumu využita jako orientační analytická metoda k ověření základního prvkového složení polymerních filamentů a sádrového substrátu; v průběhu experimentu nebyly touto metodou zaznamenány žádné signifikantní změny, které by indikovaly relevantní materiálové interakce.

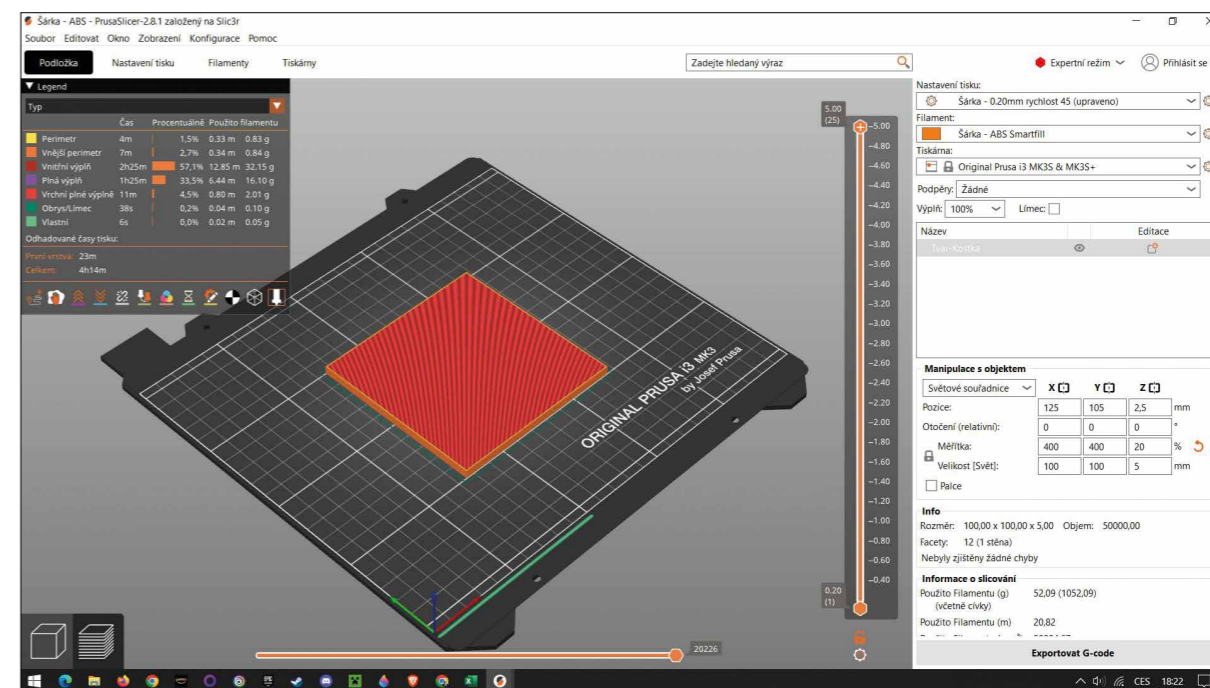
Kombinace uvedených metod umožnila komplexní pohled na chování testovaných filamentů a poskytla podklad pro jejich hodnocení z hlediska restaurátorské vhodnosti.

Standardizace vzorků a kontrola experimentálních podmínek

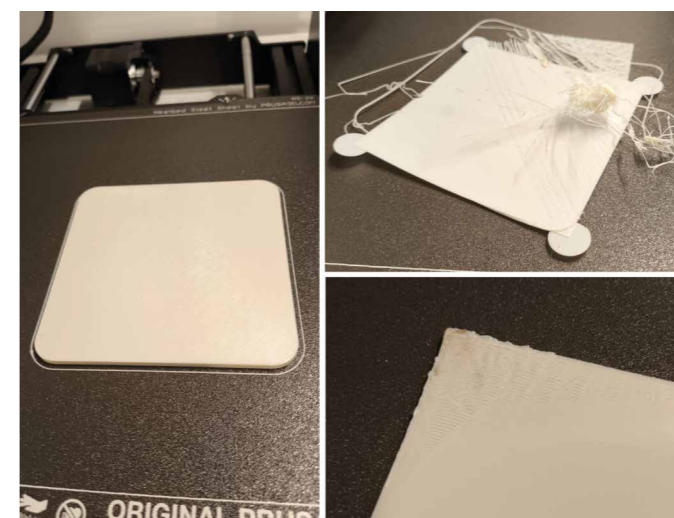
Pro zajištění srovnatelnosti výsledků byla přípravě vzorků věnována zvláštní pozornost. Standardizace se týkala jak samotných polymerních tiskových výstupů, tak sádrového substrátu. Sádrové vzorky byly připravovány z jednoho typu materiálu a za kontrolovaných podmínek, aby se minimalizoval vliv rozdílné pórovitosti, hustoty a vlhkostního chování, které by mohly ovlivnit výsledky analytických metod.

Polymerní vzorky byly tištěny s jednotnou orientací vrstev a konstantními tiskovými parametry. Cílem nebylo optimalizovat mechanickou pevnost nebo vizuální kvalitu výtisků, ale vytvořit reprezentativní modelové vzorky odpovídající běžné restaurátorské praxi (Obr. 6 a 7). Tento přístup reflektuje skutečnost, že v reálných zásazích nejsou polymerní doplňky obvykle vyráběny v laboratorně optimalizovaných podmínkách, ale v rámci časových a technologických omezení konkrétní zakázky.

Kontrola experimentálních podmínek byla zásadní zejména s ohledem na vlhkostní režim, který má na chování sádry i polymerů významný vliv. Před zahájením testů byly všechny vzorky aklimatizovány, aby se minimalizoval vliv krátkodobých vlhkostních fluktuací na výsledky měření.



Obr. 6 Náhled tiskových parametrů a geometrie testovacího vzorku v softwaru PrusaSlicer 2.8.1 před výrobou pomocí technologie FDM. Zobrazen je deskový vzorek z polymeru ABS připravený pro experimentální testování, s jednotnými rozměry 100 × 100 × 5 mm a výplní 100 %, tisknutý na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+. Vizualizace dokumentuje standardizaci geometrie, orientace a vnitřní struktury vzorků použitých v následných analytických a stárnocích testech. [© TH, 2024]



Obr. 7 Typické problémy při FDM tisku deskových vzorků z ABS během optimalizace tiskových parametrů (smršťování, a poruchy adheze k podložce). [© TH, 2024]

Limity zvolených analytických metod

Zvolená metodika byla navržena jako kompromis mezi laboratorní přesností a praktickou aplikovatelností výsledků v restaurátorské praxi. Je proto nezbytné otevřeně reflektovat limity jednotlivých analytických metod a jejich interpretace.

FTIR spektroskopie umožňuje detekci změn v chemické struktuře polymerů, avšak neposkytuje kvantitativní informaci o rychlosti degradačních procesů v reálném čase. Zjištěné změny je proto nutné interpretovat jako indikátory potenciální nestability, nikoli jako přímou predikci životnosti materiálu (DERRICK, STULIK, LANDRY, 1999).

Kolorimetrická měření poskytují objektivní data o barevných změnách, avšak jejich vnímání v restaurátorském kontextu je vždy závislé na konkrétní situaci, osvětlení a vizuálním kontextu díla. Hodnoty ΔE proto nelze automaticky interpretovat jako přijatelné či nepřijatelné bez ohledu na charakter zásahu.

SEM pozorování umožňuje detailní analýzu povrchových změn, avšak sleduje pouze lokální oblasti vzorku. Morfologické změny detekované touto metodou je proto nutné chápat jako kvalitativní indikátory degračních procesů, nikoli jako reprezentativní obraz celého materiálu.

Cross-infection test představuje nepřímý nástroj hodnocení emisí VOC. Test neidentifikuje konkrétní chemické sloučeniny, ale slouží jako screeningový nástroj pro posouzení potenciálního rizika materiálu v uzavřeném prostředí (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

Časová posloupnost experimentu a logika výzkumného designu

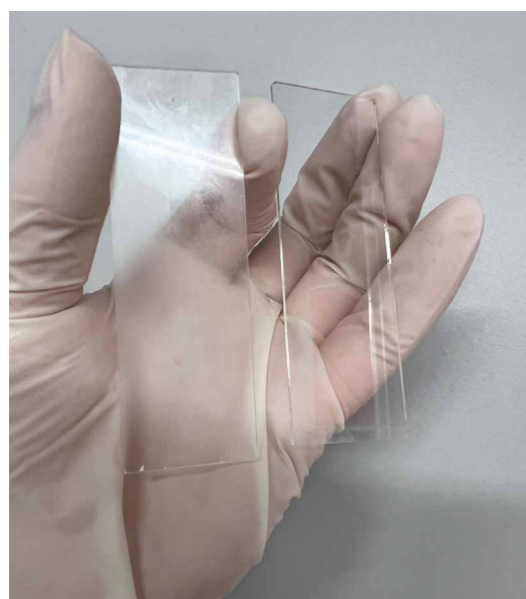
Experimentální výzkum byl navržen jako sekvenční proces, v němž na sebe jednotlivé kroky metodicky navazovaly a umožňovaly postupné zpřesňování hodnocení chování testovaných polymerních materiálů. Cílem nebylo pouze získání izolovaných analytických dat, ale vytvoření uceleného obrazu materiálového chování polymerů v kontaktu se sádrov v čase.

V první fázi experimentu byly připraveny referenční vzorky polymerních filamentů a sádry, které sloužily jako výchozí bod pro následná porovnání. Tyto vzorky byly analyzovány pomocí FTIR, kolorimetrie a SEM/SEI s cílem zdokumentovat jejich počáteční chemický a fyzikální stav. Tato fáze umožnila oddělit změny způsobené samotným výrobním procesem od změn vznikajících v průběhu stárnutí.

Následně byly vzorky vystaveny teplo-vlhkému umělému stárnutí. Tento krok představoval klíčový bod experimentu, neboť umožnil sledovat akcelerované projevy degračních procesů, které by se v reálných podmínkách projevily v dlouhodobém horizontu. Po ukončení stárnutí byly vzorky opět analyzovány stejnými metodami jako v počáteční fázi, což umožnilo přímé porovnání výsledků.

Cross-infection test byl do experimentální sekvence zařazen jako závěrečný krok, jehož cílem bylo posoudit nepřímé riziko polymerních materiálů pro okolní citlivé substráty. Tento test nebyl koncipován jako izolovaná metoda, ale jako doplněk k chemickým a fyzikálním analýzám, který rozšiřuje hodnocení materiálů o hledisko preventivní konzervace.

Takto strukturovaná časová posloupnost experimentu umožnila systematické sledování změn polymerních materiálů a zároveň poskytla rámec pro interpretaci výsledků v širším kontextu restaurátorské praxe.



Obr. 8 Transparentní depozit pozorovaný na skleněném nosiči po ukončení cross-infection testu se vzorky PLA a referenční celulózu. Depozit vznikl v důsledku uvolňování a následné kondenzace degračních produktů polymeru během umělého stárnutí v uzavřeném mikroprostředí. Chemická analýza depozitu potvrdila přítomnost laktátu, dilaktátu a trilaktátu, odpovídajících degračním produktům kyseliny polymléčné; současně byla detekována další dusíkatá sloučenina bez jednoznačné identifikace, jejíž povaha bude předmětem navazujícího výzkumu. [ŠV, 2025]

Výsledky experimentálního výzkumu

Výsledky experimentální části výzkumu potvrdily, že jednotlivé testované polymerní materiály vykazují v kontaktu se sádrov výrazně odlišné chování, a to jak z hlediska chemické stability, tak z hlediska potenciálních vedlejších účinků, zejména emisí těkavých organických látek. Tyto rozdíly se projeví napříč použitými analytickými metodami a byly dále zvýrazněny po aplikaci teplo-vlhkého stárnutí.

PLA (polylactic acid)

Filament PLA vykázal v rámci experimentu nejvýraznější známky degradace. FTIR analýza po teplo-vlhkém stárnutí potvrdila změny charakteristických absorpčních pásů, které lze spojit s hydrolytickým štěpením polymerního řetězce. Tyto změny byly doprovázeny viditelnými morfologickými projevy, pozorovanými pomocí SEM/SEI, včetně mikrotrhlin a změn povrchové struktury. (Obr. 8)

Kolorimetrická měření zaznamenala u vzorků PLA statisticky významné barevné změny (ΔE), které jsou z restaurátorského hlediska problematické zejména v případě pohledových doplňků. Výsledky cross-infection testu navíc naznačily zvýšené riziko emisí degračních produktů, které mohou v uzavřeném prostředí negativně ovlivňovat okolní citlivé materiály.

Tyto výsledky odpovídají známým vlastnostem PLA jako polymeru náchylného k degradaci v prostředí se zvýšenou vlhkostí a teplotou (SAN ANDRÉS MOYA et al., 2023; RIVERA-LÓPEZ et al., 2024). Z hlediska dlouhodobé stability a kompatibility se sádrov se PLA jeví jako materiál nevhodný pro použití v restaurátorských zásazích, které předpokládají dlouhodobý kontakt s originálem.

ABS (acrylonitrile butadiene styrene)

ABS vykazoval ve srovnání s PLA vyšší chemickou stabilitu, což se projevilo relativně malými změnami ve FTIR spektrech i absencí výrazných morfologických poruch pozorovaných pomocí SEM. Kolorimetrické změny byly u tohoto materiálu méně výrazné než u PLA, přesto však nebyly zcela zanedbatelné.

Problematickým aspektem ABS se ukázaly především emise těkavých organických látek. Výsledky cross-infection testu naznačily potenciální riziko uvolňování látek, které mohou mít negativní vliv na organické materiály v blízkosti polymeru. Tento poznatek je v souladu s dřívějšími studii upozorňujícími na emise styrenových sloučenin z ABS, zejména při zvýšené teplotě nebo dlouhodobém stárnutí (CIMINO et al., 2018; WOJNOWSKI et al., 2022; WOJTYŁA, KLAMA, BARAN, 2017).

Z restaurátorského hlediska tak ABS představuje materiál, jehož použití v přímém kontaktu se sádrov vyžaduje značnou opatrnost a individuální posouzení konkrétní situace.

PETG (polyethylene terephthalate glycol)

PETG vykázal v rámci experimentu příznivější chování než PLA i ABS. FTIR analýza po teplo-vlhkém stárnutí neodhalila zásadní změny chemické struktury polymeru a SEM pozorování neprokázalo významné morfologické poruchy povrchu. Kolorimetrické změny byly u PETG nízké a pohybovaly se v mezích, které lze považovat za akceptovatelné pro řadu restaurátorských aplikací.

Výsledky cross-infection testu naznačily nižší míru emisí VOC ve srovnání s ABS, přesto však nelze PETG považovat za zcela inertní materiál. Zjištění emise a jejich potenciální vliv na okolní materiály zdůrazňují nutnost individuálního testování před jeho použitím v konkrétním restaurátorském zásahu.

PMMA (polymethyl methacrylate)

Nejpříznivější výsledky byly v rámci experimentu zaznamenány u PMMA. FTIR spektra nevykazovala po teplo-vlhkém stárnutí výrazné změny, což svědčí o vysoké chemické stabilitě tohoto polymeru. SEM pozorování potvrdilo zachování kompaktní povrchové struktury bez známek mikrodegradace a kolorimetrická měření prokázala minimální barevné změny.

Výsledky cross-infection testu ukázaly nízkou úroveň emisí VOC, což z hlediska dlouhodobého kontaktu s citlivými materiály představuje významnou výhodu. Tyto vlastnosti odpovídají dlouhodobě známému chování PMMA, který byl v minulosti v konzervaci a restaurátorství využíván právě pro svou relativní stabilitu (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

Je však nutné zdůraznit, že ani PMMA nelze považovat za univerzálně ideální materiál. Jeho chování je závislé na konkrétních podmínkách prostředí, způsobu aplikace a délce kontaktu s originálním materiálem.

Syntéza výsledků napříč analytickými metodami

Pro interpretaci výsledků bylo klíčové posoudit chování jednotlivých polymerních materiálů nikoli izolovaně podle jednotlivých metod, ale v jejich vzájemném kontextu. Kombinace FTIR, kolorimetrie, SEM a cross-infection testu umožnila identifikovat materiály, u nichž se degrační procesy projevují konzistentně napříč různými analytickými přístupy.

U PLA se degrační procesy projevily jak na úrovni chemické struktury, tak v oblasti vizuálních a emisních charakteristik.

U PETG a ABS byly výsledky méně jednoznačné. Zatímco některé metody naznačovaly relativní stabilitu materiálu, jiné poukázaly na potenciální rizika, zejména v oblasti emisí VOC. Tento rozpor potvrzuje, že hodnocení polymerních materiálů nelze redukovat na jediný parametr, například mechanickou pevnost nebo barevnou stálost.

PMMA vykazovalo konzistentně příznivé výsledky napříč použitými metodami, což podporuje jeho hodnocení jako materiálu s relativně stabilním chováním v rámci testovaných parametrů.

Výsledky FTIR analýzy

Fourierova infračervená spektroskopie (FTIR) byla použita k posouzení chemických změn polymerních filamentů před a po teplo-vlhkém umělém stárnutí. Analýza byla zaměřena na sledování změn charakteristických absorpčních pásů jednotlivých polymerů, které mohou indikovat degrační procesy probíhající v materiálu.

U filamentů PLA byly po umělém stárnutí zaznamenány výrazné změny v oblasti charakteristických pásů odpovídajících esterovým vazbám. Tyto změny lze spojit s hydrolytickým štěpením polymerního řetězce, které je pro PLA typické v prostředí se zvýšenou vlhkostí a teplotou (SAN ANDRÉS MOYA et al., 2023; RIVERA-LÓPEZ et al., 2024). FTIR spektra dále vykazovala zvýraznění pásů souvisejících s přítomností degračních produktů, což potvrzuje probíhající chemickou degradaci materiálu.

U ABS nebyly po umělém stárnutí zaznamenány zásadní změny hlavních charakteristických absorpčních pásů polymeru. Spektra vykazovala relativní stabilitu chemické struktury, přičemž drobné změny intenzity jednotlivých pásů nelze jednoznačně interpretovat jako projev významné chemické degradace. Tyto výsledky odpovídají obecně popisované vyšší chemické stabilitě ABS ve srovnání s PLA (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

FTIR analýza PETG po stárnutí neprokázala výrazné změny v oblasti hlavních absorpčních pásů. Chemická struktura polymeru zůstala z hlediska FTIR spekter relativně stabilní, bez zjevných indikací pokročilé degradace. Zjištěné výsledky naznačují, že PETG vykazuje vyšší odolnost vůči podmínkám teplo-vlhkého stárnutí než PLA, a to alespoň v rámci sledovaného časového úseku experimentu.

U PMMA byla FTIR spektra před a po stárnutí prakticky totožná. Nebyly zaznamenány významné změny charakteristických pásů ani vznik nových absorpčních maxim, které by naznačovaly chemickou degradaci polymerního řetězce. Tyto výsledky potvrzují vysokou chemickou stabilitu PMMA, která je v odborné literatuře dlouhodobě popisována (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

Výsledky kolorimetrického měření (ΔE)

Kolorimetrická měření byla provedena za účelem objektivního posouzení barevných změn povrchů polymerních filamentů v průběhu experimentu. Hodnoceny byly hodnoty celkové barevné odchylky (ΔE) mezi vzorky před a po teplo-vlhkém stárnutí.

U filamentů PLA byly zaznamenány nejvyšší hodnoty ΔE ze všech testovaných materiálů. Barevné změny byly vizuálně patrné a odpovídaly chemickým změnám zjištěným pomocí FTIR analýzy. Zvýšené hodnoty ΔE naznačují nejen změnu barevnosti, ale i možnou změnu povrchových vlastností materiálu, která může být z restaurátorského hlediska problematická, zejména u pohledových doplňků.

ABS vykazoval po umělém stárnutí nižší hodnoty ΔE než PLA, přesto však nebyly barevné změny zcela zanedbatelné. Zaznamenané odchylky naznačují, že i u tohoto polymeru dochází k určitým změnám povrchových vlastností, které mohou být v dlouhodobém horizontu relevantní.

U PETG byly hodnoty ΔE nízké a pohybovaly se v rozmezí, které lze považovat za relativně stabilní z hlediska barevnosti. Barevné změny nebyly výrazné a nebyly vizuálně dominantní, což odpovídá výsledkům chemické analýzy, která neprokázala zásadní degradaci polymeru.

PMMA vykazovalo nejnižší hodnoty ΔE ze všech testovaných materiálů. Barevné změny byly minimální a v rámci experimentu prakticky zanedbatelné. Tyto výsledky potvrzují vysokou barevnou stabilitu PMMA i při vystavení zvýšené teplotě a vlhkosti.

Výsledky SEM/SEI pozorování

Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM/SEI) byla využita k detailnímu pozorování povrchových změn polymerních filamentů a případných interakcí se sádrovým substrátem. Pozornost byla věnována zejména přítomnosti mikrotrhlin, změn povrchové morfologie a známek fyzikální degradace.

U PLA byly po teplo-vlhkém stárnutí pozorovány výrazné změny povrchové struktury. SEM snímky dokumentovaly vznik mikrotrhlin a nerovností, které nebyly patrné na referenčních vzorcích před stárnutím. Tyto morfologické změny korespondují s chemickou degradací polymeru zjištěnou pomocí FTIR analýzy.

ABS vykazoval relativně stabilní povrchovou strukturu, přičemž nebyly zaznamenány výrazné mikrotrhliny ani rozsáhlé morfologické změny. Povrch polymeru si zachoval kompaktní charakter, což odpovídá výsledkům chemické analýzy, která neprokázala významnou degradaci polymerního řetězce.

U PETG byly pozorovány pouze drobné změny povrchové morfologie, které však nelze jednoznačně interpretovat jako projevy pokročilé degradace. Povrch zůstal relativně homogenní a bez výrazných strukturálních poruch.

PMMA vykazovalo nejstabilnější povrchovou strukturu ze všech testovaných materiálů. SEM snímky neodhalily významné změny morfologie ani vznik mikrotrhlin. Povrch polymeru zůstal hladký a kompaktní i po umělém stárnutí.

Výsledky cross-infection testu (VOC)

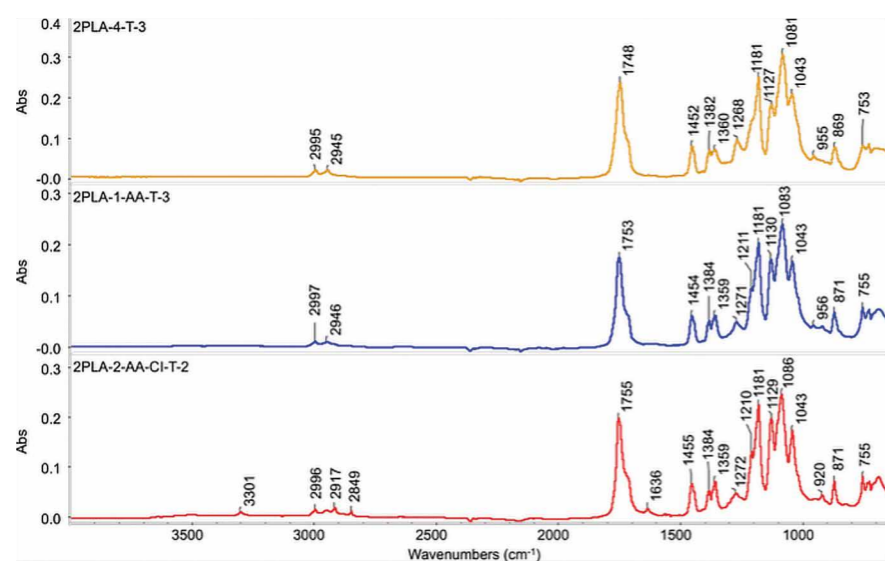
Cross-infection test byl aplikován s cílem posoudit potenciální emise těkavých organických látek (VOC) z polymerních filamentů a jejich možný vliv na citlivé organické materiály v okolí. Test byl proveden jako screeningový nástroj pro identifikaci materiálů, které mohou představovat zvýšené riziko v uzavřeném prostředí depozitářů nebo výstavních prostor.

U PLA byly v rámci testu zaznamenány projevy, které naznačují uvolňování degradačních produktů schopných negativně ovlivnit referenční celulóзовý materiál. Tyto výsledky korespondují s chemickou degradací polymeru zjištěnou pomocí FTIR analýzy a potvrzují problematické chování PLA z hlediska emisí. (Obr. 9)

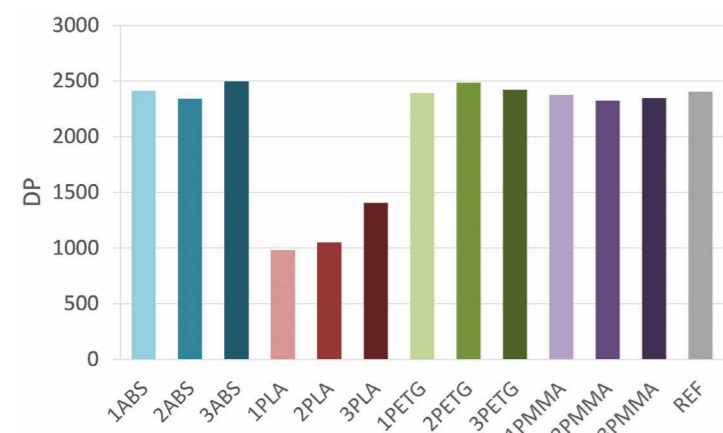
ABS vykazoval rovněž známky emisí VOC, které mohou představovat riziko zejména při dlouhodobém použití v uzavřeném prostředí. Tyto výsledky jsou v souladu s literaturou upozorňující na emise styrenových sloučenin z ABS polymerů (WOJNOWSKI et al., 2022; WOJTYŁA, KLAMA, BARAN, 2017; CIMINO et al., 2018).

U PETG byly projevy emisí méně výrazné, přesto však nebyly zcela zanedbatelné. Test naznačil, že i tento polymer může v určitých podmínkách uvolňovat látky s potenciálním vlivem na okolní materiály, což podporuje potřebu individuálního posouzení jeho použití v konkrétních aplikacích.

PMMA vykazovalo v rámci cross-infection testu nejpříznivější chování. Projevy emisí VOC byly minimální a v porovnání s ostatními testovanými materiály zanedbatelné. Tyto výsledky potvrzují dlouhodobě popisovanou relativní inertnost PMMA v konzervátorském kontextu (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024). (Obr. 10)



Obr. 9 FTIR spektrální změny u vzorku PLA-2 po umělém stárnutí a následném cross-infection testu. Spektrum vykazuje změny srovnatelné se vzorkem PLA-1, včetně posunu karbonylového pásu a vzniku nových absorpčních pásů v oblasti přibližně 3300 a 1640 cm^{-1} , interpretovaných jako projevy amidových struktur. Zvýšení intenzity vybraných pásů zároveň podporuje hypotézu nárůstu krystalinity polymeru v průběhu stárnutí. [VK, 2025]



Obr. 10 Porovnání stupně polymerizace (DP) referenční celulózy po cross-infection testu s vybranými polymerními materiály (ABS, PLA, PETG a PMMA). Nejvýraznější pokles DP byl zaznamenán u vzorků vystavených polymeru PLA, což svědčí o jeho vysoké chemické reaktivitě a významném degradačním potenciálu vůči sousedním organickým materiálům. ABS vykazoval střední vliv, zatímco PETG a zejména PMMA zůstaly chemicky stabilní, s hodnotami DP blízkými referenční celulóze (REF). Výsledky potvrzují nevhodnost PLA pro použití v kontaktu s historickými materiály a naopak indikují PMMA jako nejbezpečnější z testovaných polymerů. [VK, 2025]

Diskuze

Diskuze výsledků jednotlivých analytických metod

Diskuze výsledků je v této studii založena na kombinovaném vyhodnocení několika analytických metod, z nichž každá sleduje odlišný aspekt materiálového chování polymerních filamentů. Tento přístup odpovídá skutečnosti, že žádná z použitých metod sama o sobě neposkytuje dostatečný podklad pro komplexní posouzení vhodnosti polymeru pro restaurátorské použití.

Výsledky FTIR analýzy poskytly informace o chemické stabilitě polymerních řetězců a o přítomnosti degradačních procesů probíhajících na molekulární úrovni. Zatímco u PLA byly změny ve FTIR spektrech jednoznačně spojitelné s hydrolytickou degradací, u ostatních testovaných polymerů byly chemické změny méně výrazné nebo zcela absentující. FTIR tak sloužila jako klíčový nástroj pro identifikaci materiálů s potenciálně problematickým dlouhodobým chováním, avšak sama o sobě neumožňuje posoudit vizuální nebo emisní aspekty degradace (DERRICK, STULIK, LANDRY, 1999).

Kolorimetrická měření (ΔE) umožnila kvantifikovat barevné změny polymerních filamentů, které mají přímý dopad na jejich použitelnost v restaurátorské praxi, zejména v případě pohledových doplňků. Výsledky ukázaly, že chemická stabilita polymeru neznamena automaticky barevnou stálost. U některých materiálů byly zaznamenány barevné změny i v případech, kdy FTIR analýza neprokázala výraznou chemickou degradaci. To potvrzuje, že vizuální změny mohou být způsobeny povrchovými procesy, které nejsou vždy zachytilitelné na úrovni chemické struktury polymeru.

SEM/SEI pozorování poskytlo detailní pohled na fyzikální projevy stárnutí polymerních materiálů. Zjištěné morfologické změny, jako je vznik mikrotrhlin nebo změna povrchové struktury, byly u některých materiálů patrné i v případech, kdy chemická analýza neindikovala výraznou degradaci. Tyto výsledky poukazují na skutečnost, že fyzikální degradace může probíhat nezávisle na chemických změnách detekovatelných pomocí FTIR a může mít zásadní význam pro dlouhodobou mechanickou stabilitu doplňků. Je přitom patrné, že přístupy zaměřené primárně na optimalizaci mechanických vlastností FDM výtisků, typické pro technickou literaturu, mohou vést k závěru o „stabilitě“ materiálu, které však nereflektují jeho dlouhodobé chemické chování nebo emisní rizika, jak ukazuje například studie Rivera-López et al. (2024) zaměřená výhradně na mechanické parametry PLA.

Cross-infection test doplnil analytický rámec o hodnocení nepřímých rizik spojených s emisemi těkavých organických látek. Výsledky tohoto testu ukázaly, že i polymerní materiály vykazující relativní chemickou a vizuální stabilitu mohou představovat riziko pro okolní citlivé materiály, zejména v uzavřených nebo špatně větraných prostorech. Tento aspekt je v restaurátorské praxi často podceňován, přestože má zásadní význam pro preventivní konzervaci (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

Získané výsledky tak potvrzují, že hodnocení vhodnosti 3D tištěných polymerních materiálů v restaurátorské praxi nelze redukovat na jednotlivé technologické nebo analytické parametry, ale musí být zasazeno do širšího etického a metodologického rámce ochrany kulturního dědictví (ĎOUBAL, VYHNÁNKOVÁ, REJMAN, 2025).

Limity experimentu a přenositelnost výsledků

Přestože byl výzkum navržen s cílem postihnout klíčové aspekty chování polymerních filamentů v kontaktu se sádrou, je nezbytné otevřeně reflektovat jeho limity a hranice přenositelnosti získaných výsledků do restaurátorské praxe.

Zásadním omezením experimentu je použití umělého teplo-vlhkého stárnutí jako modelu dlouhodobého působení environmentálních faktorů. Ačkoli je tento přístup v konzervátorské vědě běžně využíván, nelze jeho výsledky interpretovat jako přímou predikci chování materiálů v reálném čase. Umělé stárnutí slouží především k identifikaci potenciálních rizikových trendů, nikoli k přesnému stanovení životnosti materiálů (CURRAN et al., 2017; PAOLIN & STRLIČ, 2024).

Dalším limitem je standardizovaná povaha testovaných vzorků. Polymerní filamenty byly hodnoceny ve formě laboratorních vzorků, které nemohou plně reflektovat komplexitu reálných restaurátorských zásahů, kde hraje roli geometrie doplňku, způsob jeho uchycení, použití adheziv a specifické mikroklimatické podmínky konkrétního objektu. Výsledky je proto nutné chápat jako obecný materiálový rámec, nikoli jako univerzální návod pro aplikaci.

Omezení se týkají rovněž výběru materiálů. Studie se zaměřila na základní polymerní filamenty bez přídavných plniv, pigmentů nebo kompozitních složek. Chování kompozitních materiálů, které jsou v současnosti na trhu stále častěji dostupné, může být výrazně odlišné a nelze je na základě těchto výsledků hodnotit (VYHNÁNKOVÁ, 2025a).

Přenositelnost výsledků je dále ovlivněna skutečností, že studie sledovala výhradně interakci polymerních filamentů se sádrou. Výsledky nelze automaticky vztahovat na jiné historické materiály, jako je kámen, dřevo nebo keramika, které vykazují odlišné fyzikální a chemické vlastnosti. Každý materiál kulturního dědictví vyžaduje individuální přístup a samostatné hodnocení kompatibility.

Navzdory těmto limitům poskytuje výzkum cenný podklad pro informované rozhodování v restaurátorské praxi. Jeho přínosem není formulace univerzálních doporučení, ale identifikace rizikových faktorů a zdůraznění nutnosti systematického testování polymerních materiálů před jejich aplikací v památkové péči.

Etické a metodologické důsledky použití FDM polymerů v restaurování

Diskuze výsledků experimentálního výzkumu nevyhnutelně otvírá otázku etických a metodologických důsledků používání polymerních materiálů vyrobených technologií FDM v restaurování sochařských děl. Ačkoli samotný výzkum byl zaměřen na materiálové chování polymerů, jeho výsledky mají přímý dopad na rozhodovací proces restaurátora.

Otázka odpovědnosti restaurátora za dlouhodobé důsledky použití 3D tištěných polymerů byla v českém prostředí dosud reflektována především v kontextu jednotlivých případových studií a eticko-technické analýzy konkrétních zásahů (ĎOUBAL, VYHNÁNKOVÁ, REJMAN, 2025; VYHNÁNKOVÁ, 2023; VYHNÁNKOVÁ, 2025b). Výsledky předloženého experimentálního výzkumu na tuto rovinu navazují a rozšiřují ji o systematická materiálová data.

Jedním z klíčových aspektů je otázka odpovědnosti za dlouhodobé důsledky zásahu. Výsledky ukazují, že i materiály vykazující relativní stabilitu v krátkodobém horizontu mohou představovat riziko v delším časovém měřítku, a to zejména prostřednictvím emisí těkavých organických látek nebo postupné fyzikální degradace.

Výzkum zároveň poukazuje na nutnost rozlišovat mezi použitím 3D tisku jako nástroje dokumentace nebo prezentace a jeho využitím v přímém kontaktu s originálním dílem. Zatímco v prvním případě jsou materiálová rizika relativně omezená, ve druhém případě se jedná o plnohodnotný restaurátorský zásah, který musí splňovat stejné nároky na materiálovou kompatibilitu, reverzibilitu a minimalizaci rizika jako jakýkoli jiný doplněk.

Z metodologického hlediska výsledky podporují potřebu systematického testování nových materiálů před jejich aplikací v památkové péči. Přenos postupů a materiálů z oblasti průmyslového designu nebo amatérského 3D tisku do restaurátorské praxe bez kritického hodnocení se jeví jako neudržitelný. Studie tak nepřímo upozorňuje na absenci standardizovaných testovacích protokolů pro hodnocení polymerních materiálů v kontextu kulturního dědictví.

Zařazení etické reflexe do diskuze výsledků není v tomto případě nadstavbou, ale přirozeným důsledkem experimentálních dat. Výzkum ukazuje, že technologická inovace sama o sobě nemůže být považována za přínos, pokud není doprovázena odpovídajícím porozuměním materiálovým rizikům a dlouhodobým dopadům zásahu.

Vztah experimentálních výsledků k principům reverzibility a minimálního zásahu

Jedním ze základních principů současné konzervátorské a restaurátorské praxe je požadavek reverzibility zásahu a minimalizace jeho dopadů na originální materiál díla. Výsledky této studie umožňují nahlížet problematiku použití FDM polymerů v restaurování právě prizmatem těchto zásad, a to na základě experimentálně ověřených materiálových vlastností.

Experimentální data ukazují, že polymerní materiály aplikované v přímém kontaktu se sádrou nelze vnímat jako neutrální nebo pasivní doplňky. Chemická degradace, fyzikální změny povrchu a emise těkavých organických látek představují procesy, které mohou v dlouhodobém horizontu ovlivnit nejen samotný polymer, ale i okolní historický materiál. V tomto kontextu se koncept reverzibility ukazuje jako problematický, neboť i v případě fyzického odstranění polymerního doplňku mohou zůstat v originálním materiálu reziduální změny, které nelze jednoduše vrátit do původního stavu.

Výsledky dále naznačují, že míra zásahu není dána pouze rozsahem materiálového doplnění, ale také povahou použitého materiálu a jeho chováním v čase. Materiály vykazující relativní chemickou stabilitu a nízké emise VOC lze z hlediska principu minimálního zásahu hodnotit příznivěji než polymery s prokazatelnou degradací, a to i v případech, kdy je objem doplňku relativně malý. Minimální zásah tak nelze chápat pouze kvantitativně, ale především kvalitativně.

Z tohoto pohledu experimentální výsledky podporují potřebu rozšířeného chápání etických principů v kontextu nových technologií. Použití 3D tisku v restaurování nelze hodnotit pouze podle technologické inovativnosti nebo estetického přínosu, ale musí být posuzováno na základě dlouhodobých materiálových důsledků. Studie tímto způsobem přispívá k ukotvení experimentálních dat v širším metodologickém a etickém rámci současné památkové péče.

Závěr

Předložený výzkum se zaměřil na experimentální posouzení vybraných polymerních filamentů používaných v technologii FDM z hlediska jejich chování v kontaktu se sádrou a jejich potenciální vhodnosti pro restaurátorské aplikace. Výsledky potvrzují, že žádný z testovaných materiálů nelze považovat za univerzálně vhodný pro použití v restaurování sádrových děl a že volba polymerního materiálu musí vždy vycházet z konkrétního kontextu zásahu, typu aplikace a požadované míry reverzibility.

Experimentální data ukázala výrazné rozdíly v chování jednotlivých polymerů. PLA vykazovalo nejvýraznější projevy chemické a fyzikální degradace, barevné změny a problematické emisní chování, což jej na základě sledovaných parametrů diskvalifikuje z hlediska dlouhodobých restaurátorských aplikací v přímém kontaktu s originálním materiálem. PETG a ABS vykazovaly relativně stabilnější chování, avšak ani u těchto materiálů nelze opomenout rizika spojená zejména s emisemi těkavých organických látek a s potenciálními dlouhodobými změnami materiálových vlastností. PMMA se v rámci testovaných metod jeví jako materiál s nejvýhodnějším chováním, a to jak z hlediska chemické stability, tak z hlediska vizuálních a emisních parametrů, nicméně i v tomto případě je nutné zdůraznit, že se jedná o hodnocení omezené na konkrétní experimentální podmínky.

Zásadním přínosem studie není vytvoření hierarchického žebříčku „nejlepších“ materiálů, ale formulace metodologického rámce umožňujícího kritické a informované rozhodování o použití polymerních filamentů v restaurátorské praxi. Výzkum ukazuje, že technologická dostupnost a snadnost aplikace nemohou být považovány za dostatečné kritérium pro výběr materiálu a že hodnocení polymerů musí vždy zahrnovat kombinaci chemických, fyzikálních a emisních parametrů.

Výsledky zároveň zdůrazňují etickou dimenzi využívání 3D tisku v památkové péči. Použití polymerních materiálů vyrobených technologií FDM představuje plnohodnotný restaurátorský zásah se všemi důsledky, které z toho vyplývají, včetně odpovědnosti za dlouhodobé chování materiálu a jeho vliv na originální dílo. Studie tak přispívá k posunu diskuze o 3D tisku v restaurování od technologického nadšení k materiálově a eticky ukotvenému přístupu založenému na experimentálních datech.

Literatura

AURA-CASTRO, Elvira, Carmen DÍAZ-MARÍN, Xavier MAS-BARBERÀ, María SÁNCHEZ LÓPEZ, Elena VENDRELL VIDAL. Characterization of 3D printing filaments applied in restoration of sensitive archaeological objects using rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*. 2021, 27(4), pp. 6453657. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2019-0153>

BALLETTI, Caterina, Martina BALLARIN, Francesco GUERRA. 3D printing: state of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*. 2017, 26, 1723182. sISSN 1296-2074. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>

BURKHARDTOVÁ, Stella. Restaurování sousolí Nejsvětější Trojice v Oseckém údolí. Biologické čištění sádrovcových krust na kameni pomocí bakterií. Litomyšl, 2023. Diplomová práce (MgA.). Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/82367>

CIMINO, Dafne, Giulia ROLLO, Marco ZANETTI and Pierangiola BRACCO. 3D printing technologies: are their materials safe for conservation treatments? In: *Florence Heri-Tech 3 The Future of Heritage Science and Technologies*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, 364, 012029. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012029>

CURRAN, Katherine, Aliyah ASLAM, Aliyah; Helen GANIARIS, Robyn HODGKINS, Jacqueline MOON, Abigail MOORE, Abigail, Linda RAMSAY. Volatile Organic Compound (VOC) emissions from plastic materials used for storing and displaying heritage objects. In: *Proceedings of the ICOM-CC 18th Triennial Conference Copenhagen, 2017*. Paris: International Council of Museums, 2017. ISBN: 978-92-9012-426-9. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320065192_Volatile_organic_compound_VOC_emissions_from_plastic_materials_used_for_storing_and_displaying_heritage_objects#fullTextFileContent

DERRICK, Michele R., Dusan STULIK a James M. LANDRY. *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1999. Scientific Tools for Conservation. ISBN 0-89236-469-6. Dostupné z: https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/infrared_spectroscopy.pdf

DIZ-MELLADO, Eduardo; PÉREZ-FENOY, José; MUDARRA-MATA, Miguel; RIVERA-GÓMEZ, Carlos; GALÁN-MARÍN, Carmen. Enhancing 3D-Printed Clay Models for Heritage Restoration Through 3D Scanning. *Applied Sciences*. 2024, roč. 14, č. 23, čl. 10898. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app142310898>. Obr. 1 převzat a upraven z obr. 3b, str. 6–7

DÍAZ-MARÍN Carmen, Elvira AURA-CASTRO. Creation of 3D Implants in conservation and retention processes restoration of archaeological glass. Making 3D implants for conservation and restoration of archaeological glass. *Virtual Archaeology Review*. 2017, 8(16), pp. 1033109. ISSN 1989-9947. Dostupné z: <https://doi.org/10.4995/var.2017.5946>

DOSTÁLOVÁ, Tatjana, KASPAROVÁ, Martina, KŘÍŽ, Petr, HALAMOVÁ, Simona, JELÍNEK, Miroslav, BRADNA, Pavel a MENDRICKÝ, Jan. Intraoral scanner and stereographic 3D print in dentistry—quality and accuracy of model—new laser application in clinical practice. *Laser Physics*. 2018, roč. 28, č. 12, čl. 125602. ISSN 1555-6611. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aae067>

ĎOUBAL, Jakub, Šárka VYHNÁNKOVÁ, Petr REJMAN. Ethical and Technical Aspects of Conserving a Plaster Cast Using 3D Printing. *Journal of the American Institute for Conservation*, 2025, 64(2), pp. 123-138. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/01971360.2025.2453962>

GATZSCHE, Alexander. 3D-Dokumentation und additive Fertigung in der Restaurierung und Archäologie: Ergebnisse der Arbeiten in Wad Ben Naga (Sudan). [online]. 2015. Dostupné z: <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/restarch/article/view/29551?utm> Obr. 1 převzat a upraven ze str. 20–21

KNOTEK, Vítězslav, Michal ĎUROVIČ a Irena KUČEROVÁ. The effect of synthetic polymer foams on cellulosic material degradation. *Materials* [online]. 2023, 16(3), 1210. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16031210>

LARKIN, Nigel a Laura PORRO. The use of 3D printing in the teaching of vertebrate anatomy. *Journal of Anatomy*, 2016, roč. 229, č. 4, s. 589–599. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312083258_Three_legs_good_four_legs_better_Making_a_quagga_whole_again_with_3D_printing Obr. 1 převzat a upraven z obr. 9, str. 82

MERCHÁN, M. J.; MERCHÁN, P.; SALAMANCA, S.; PÉREZ, E.; NOGALES, T. Digital fabrication of cultural heritage artwork replicas. In the search for resilience and socio-cultural commitment. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2019, roč. 15, e00125. ISSN 2212-0548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00125>. Obr. 1 převzat z obr. 9, str. 7

NADAGOUDA, Mallikarjuna N., Vandita RASTOGI, Megan GINN. A review on 3D printing techniques for medical applications. *Current Opinion in Chemical Engineering* 2020, 28:152–157. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.coch.2020.05.007>

NEUMILLER, Moritz. Tactile images: 3D printing and access to images for blind and visually impaired people. *Studies in Conservation*. 2018, roč. 63, č. 6, s. 356–360. ISSN 0039-3630. Dostupné z: https://www.academia.edu/46966191/Tactile_Photos Obr.1 převzat a upraven z obr. 3, str. 6

NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Giuseppe IMBALZANO, Kate NGUYEN, Kate HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, vol. 143, pp. 1723196. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

OBEED, Nareen Hafidh, Wisam K. HAMDAN. Reconstruction and evaluation of 3D printing PMMA cranioplasty implants. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024, vol. 18, pp. 4233–4245. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01979-9>

PAOLIN, Emma, Matija STRLIČ. Volatile Organic Compounds (VOCs) in Heritage Environments and Their Analysis: A Review. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 11, article no. 4620. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app14114620>

REMONDINO, Fabio, Alessandro RIZZI. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics* 2: 853100. 2010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>

RIVERA-LÓPEZ, Fernando, María M. Laz PAVÓN, Eduardo Cabello CORREA, María Hernández MOLINA. Effects of nozzle temperature on mechanical properties of polylactic acid specimens fabricated by fused deposition modeling. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 13, p. 1867. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16131867>

SAN ANDRÉS MOYA, Margarita, Ruth CHÉRCOLES, Eduardo NAVARRO, José Manuel DE LA ROJA, Javier, GOROSTIZA, María HIGUERAS, Elena BLANCH. Use of 3D printing PLA and ABS materials for fine art: Analysis of composition and long-term behaviour of raw filament and printed parts. *Journal of Cultural Heritage*. 2023, 59, 181. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.12.005>

SÁNCHEZ-BELENQUER, Carlos; Eduardo VENDRELL-VIDAL; Miguel SÁNCHEZ-LÓPEZ; Carmen DÍAZ-MARÍN, a Elvira AURA-CASTRO. Automatic production of tailored packaging for fragile archaeological artifacts. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2015, roč. 8, č. 3, čl. 17, s. 1–11. Dostupné z: <https://scispace.com/pdf/automatic-production-of-tailored-packaging-for-fragile-11y85y1myh.pdf?utm>. Obr. 1 převzat a upraven z obr. 5, str. 7

SCHUBERTHAN, Lisa. Die Frontscheibe der Cessna F 172 P „Skyhawk“ – Ergänzung von Polymethylmethacrylat mit 3D-Druck-Materialien. Poster. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Studiengang Konservierung und Restaurierung, 2019. Dostupné z: <https://kr.htw-berlin.de>

SCOPIGNO, Roberto, Paolo CIGNONI, Nico PIETRONI, Marco CALLIERI, Matteo DELLEPIANE. Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. *Computer Graphics Forum*, 2017. 36 (1): 6321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/cgf.12781>. Obr. 1 převzat z obr. 4, p. 9

VYHNÁNKOVÁ, Šárka. Restaurování sádrového modelu *Touha k pomníku Františka Palackého v Praze od Stanislava Suchardy*. Litomyšl, 2023. Bakalářská práce (BcA.). Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování. Dostupné z: <https://theses.cz/id/ywtw2z/?isshret=Šárka%3BVyhnánková%3B;zpet=%2Fvyhledavani%2F%3Fsearch%3Dvyhnánková%20šárka%26start%3D1>

VYHNÁNKOVÁ, Šárka. Suitability of Selected 3D Printing Materials for Conservation Purposes Using FDM Technology. Litomyšl, 2025a. Diplomová práce (MgA.). Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování. Dostupné z: <https://theses.cz/id/jf8839/?isshret=Šárka%3BVyhnánková%3B;zpet=%2Fvyhledavani%2F%3Fsearch%3Dvyhnánková%20šárka%26start%3D1>

VYHNÁNKOVÁ, Šárka. Ethical Aspects of 3D Technologies in Sculpture Conservation. Master's thesis. Vienna: University of Applied Arts Vienna, Institute of Conservation. 2025b. Diplomová práce (MA). Dostupné z: <https://phaidra.bibliothek.uni-ak.ac.at/o:74367>

WOJNOWSKI, Wojciech, Mariusz MARĆ, Kaja KALINOWSKA, Paulina KOSMELA and Bożena ZABIEGAŁA. Emission profiles of volatiles during 3D printing with ABS, ASA, Nylon and PETG polymer filaments. *Molecules*, 2022, 27(12), 3814. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules27123814>

WOJTYŁA, Szymon; KLAMA, Piotr; BARAN, Tomasz. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. D80–D85. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489>

YILMAZ, Sinan. Comparative investigation of mechanical, Tribological and Thermo-Mechanical Properties of Commonly Used 3D Printing Materials. *European Journal of Science and Technology*, 2021, Special Issue 32, pp. 8273831. ISSN 2148-2683. Dostupné z: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1040085>

Autoři fotografií:

[KB] Karol Bayer; [ŠV] Šárka Vyhnánková; [TH] Tomáš Harapát; [VK] Vítězslav Knotek