

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh a optimalizace pracoviště 3D tisku

Design and optimization of the 3D printing workplace

AUTOR: Pavlína Salabová

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Šimota

PRAHA 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Salabová** Jméno: **Pavčina** Osobní číslo: **501426**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a optimalizace pracoviště 3D tisku

Název bakalářské práce anglicky:

Design and optimization of the 3D printing workplace

Pokyny pro vypracování:

Analýza současného stavu technologie 3D tisku.
Trendy v oblasti FDM a SLA technologií.
Návrh optimálního pracoviště 3D tisku.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá především návrhem a optimalizací pracoviště 3D tisku. Jsou zde detailně popsány dvě vybrané technologie 3D tisku, jedná se o technologie FDM a SLA. V textu se nachází nejen princip tisku, ale též popis vhodných materiálů a druhů tiskáren. Pracoviště jsou rozdělena na tři navazující části, kterým jsou přiřazeny potřebné pomůcky či nábytek. Podstatnou část této práce tvoří průzkum různých studií na téma zdravotního uzpůsobení prostor. Stěžejním faktorem pro návrh pracovišť je koncentrace uvolňovaných částic do vzduchu v průběhu tisku, jsou zde popsány hygienické limity a také ergonomie pracovního místa. Tato práce byla též obohacena o experiment v podobě měření částic při FDM tisku na půdě ČVUT v Praze. V závěru jsou navržena dvě pracoviště, která byla vizualizována do podoby 3D místností a postupně optimalizována do své ideální podoby.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, SLA, materiály, emise částic, měření částic, hygienické limity, zdravotní uzpůsobení, ergonomie pracoviště, návrh pracoviště, vizualizace

Annotation

This bachelor's thesis mainly deals with the design and optimization of the 3D printing workplace. Two selected 3D printing technologies are described here in detail, these are FDM and SLA technologies. The text contains not only the principle of printing, but also a description of suitable materials and types of printers. The workplaces are divided into three connected parts, which are assigned the necessary tools and furniture. A substantial part of this work consists of a survey of various studies on the topic of health adaptation of spaces. The most important factor for the design of workplaces is the concentration of particles released into the air during printing, the hygienic limits and the ergonomics of the workplace are described here. This work was also enriched with an experiment in the form of measuring particles during FDM printing on the campus of the Czech Technical University in Prague. In the end, two workplaces are designed, which were visualized in the form of 3D rooms and gradually optimized to their ideal form.

Keywords

3D printing, FDM, SLA, materials, particle emissions, particle measurement, hygienic limits, medical adaptation, workplace ergonomics, workplace design, visualization

Poděkování

Tímto bych chtěla touto formou poděkovat všem, kteří jakkoliv přispěli ke zpracování mé bakalářské práce. V první řadě mé poděkování patří Ing. Janu Šimotovi, vedoucímu bakalářské práce, za jeho užitečné odborné rady, připomínky a také za jeho ochotu a trpělivost. Rovněž mé velké díky patří všem, kteří byli ochotni si práci přečíst a obohatit ji svým názorem.

Obsah

Přehled použitých symbolů a zkratk	9
Úvod	12
1 3D tisk obecně	13
2 Vybrané technologie 3D tisku	14
2.1 Technologie FDM/FFF	14
2.1.1 Princip tisku	16
2.1.2 Materiály vhodné pro tisk	17
2.2 Technologie SLA	19
2.2.1 Princip tisku	22
2.2.2 Materiály vhodné pro tisk	22
3 Druhy tiskáren	25
4 Rozdělení jednotlivých pracovišť	27
4.1 Předpřípravy a zásady správného tisku	28
4.2 Příprava tisku	29
4.3 Tisk jako takový	33
4.4 Post-processing	34
4.4.1 Automatizované úpravy výtisků	37
5 Ideální rozložení pracoviště	38
5.1 Pořadí operací a potřebné pomůcky	38
5.1.1 Příprava tisku – potřebné pomůcky, nábytek a vybavení	39
5.1.2 Průběh tisku – potřebné pomůcky, nábytek a materiály	39
5.1.3 Postprocessing – potřebné pomůcky, nábytek a materiály	41
5.2 Potřebný prostor	41
6 Zdravotní uzpůsobení prostor	42
6.1 Emise částic z komerčně dostupných stolních tiskáren	44
6.2 Experiment měření částic v průběhu FDM tisku	48
6.3 Zdravotně nezávadné modely	53
6.4 Tisk z pryskyřice	54
6.5 3D tisk v porovnání s jinými druhy pracovišť	57
6.5.1 Hygienické limity v pracovním prostředí	58
6.6 Přihlédnutí k ergonomii pracoviště	60

6.6.1	Ergonomie pracovního místa.....	61
7	Návrh pracoviště 3D tisku.....	65
7.1	Návrh dvou různých prostor.....	65
7.1.1	FDM tisk.....	65
7.1.2	SLA tisk.....	69
7.2	Zhodnocení návrhů pracovišť.....	72
	Závěr.....	73
	Seznam obrázků.....	74
	Seznam tabulek.....	76
	Bibliografie	77

Přehled použitých symbolů a zkratek

%	procento
°	stupeň
°C	stupeň Celsia
2D	dvoudimenzionální
3D	trojdimenzionální
3DP	3D printing
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
BTEX	Benzen, Toluen, Etylbenzen, Xylen
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
Cm	centimetr
cm ³	centimetr krychlový
CPC	Condensation Particle Counter
Cr(VI)	šestimocný chrom
č.	číslo
ČSN EN ISO	Česká verze mezinárodní normy
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
G-kód	programovací jazyk (příkazy pro tiskovou hlavu)
h	hodina

h^{-1}	hodina na mίnus první
HIPS	High Impact Polystyrene
IARC	International Agency for Research on Cancer
Inc.	Incorporated (veřejná obchodní společnost)
ISO	International Organization for Standardization
kg	kilogram
l/min	litr za minutu
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
m^2	metr čtvereční
m^3	metr krychlový
$mg \cdot m^{-3}$	miligram krát metr krychlový
min	minuta
min^{-1}	minuta na mίnus první
mm	milimetr
MSLA	Masked Stereolithography
např.	například
NIST	National Institute of Standards and Technology
nm	nanometr
OEHHA	Office of Environmental Health Hazard Assessment
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PC	Personal Computer
PEI	Polyéterimid
PEL_c	limit pro vdechovatelnou frakci prachu
PET	Polyethylene Terephthalate
PETG	Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate
PLA	Polylactic Acid

PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA	Polyvinyl Alcohol
Ra	aritmeticky průměrná odchylka (drsnost)
RP	Rapid Prototyping
s	sekunda
Sb.	sbírka
SD	Secure Digital
SDS	Safety Data Sheet
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
STL	souborový formát (Standard Triangle Language)
TPU	Thermoplastic Polyuretan
tzv.	takzvaně
U. S. EPA	United States Environmental Protection Agency
UFPs	Ultrafine Particles
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet
viz	odkazování (podívat se)
VOCs	Volatile Organic Compounds
x	krát
$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	mikrogram krát metr krychlový
μm	mikrometr

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a optimalizací ideálního pracoviště pro vybrané technologie 3D tisku, kterými jsou technologie FDM a technologie SLA. Jsou zde vysvětleny a popsány principy tisku, vhodný výběr materiálu pro každou technologii a jeho správné využití či pozdější aplikace. V obecném použití můžeme tiskárny rozdělit do několika kategorií, které jsou zde také rozebrány.

Hlavním tématem však zůstává samotná organizace pracoviště. Nejprve je brán zřetel na rozdělení jednotlivých celků, které patří závazně k sobě, nebo na sebe přímo navazují. Dělení je standardně do tří kategorií a to, příprava tisku, tisk samotný a post-processing. Ke každé skupině je přiřazen potřebný prostor, stroje, nástroje a nářadí. Důležité je určit správný sled operací a také zdravotní uzpůsobení těchto prostor, je tomu věnována jedna kapitola této práce.

Po důkladném rozboru je přistoupeno ke konkrétnímu rozložení jednotlivých operací s pevně daným uzpůsobením potřebné plochy. Ke každé vybrané technologii 3D tisku je po důkladné analýze vytvořen návrh místnosti, kde bude probíhat celý proces tisku. Jedná se přímo o modelovou vizualizaci jednotlivých místností i s potřebným vybavením.

V závěru práce je každý návrh zhodnocen. Nejdůležitějším faktorem hodnocení je v tomto případě zdravotní hledisko dané problematiky, a to z pohledu vypouštění jemných částic (nejenom prachu) do vzduchu. Po nastudování již uskutečněných studií byl vytvořen jednoduchý experiment pro ověření zjištěných faktů. Při návrhu místností bylo též přihlíženo k ergonomii pracovního místa, protože to má podstatný dopad na lidské zdraví a pracovní pohodu zaměstnanců.

V neposlední řadě je nutno zmínit, že rozměry místností či dostupnosti všech potřebných strojů, nástrojů a prostředků nejsou až tak podstatné, tato práce se pohybuje v oblasti ideálně zajištěných podmínek, nejedná se tedy o přímou aplikaci na již existující místnosti s již dostupným vybavením.

1 3D tisk obecně

Jedná se o automatizovaný proces, kdy se z digitální předlohy, tedy 3D modelu, vytváří fyzický model. Zpočátku byl 3D tisk označován jako Rapid Prototyping, v českém překladu tento pojem zachycuje rychlou výrobu prototypů, protože před příchodem uživatelsky dostupných tiskáren se tato technologie používala výhradně pro jejich výrobu. S tímto pojmenováním se můžeme setkat i nyní, ale používá se spíše již zmiňovaný pojem „3D tisk“. [1] [2]

Technologií výroby pomocí 3D tisku je na trhu velké množství, tou nejpoužívanější je FFF, která pracuje na jednoduchém principu. Lze se však také setkat i s mnohonásobně složitějšími. V posledním desetiletí dochází k velkému rozmachu této technologie výroby, který přispívá k neustálému vývoji tiskáren a též materiálů vhodných pro tisk nových a tvarově náročnějších produktů. Současně s tímto rozvojem došlo k rozšíření pole působnosti, z firemního prostředí se tiskárny rozšířily mezi běžné uživatele, například mezi lidové kutily. Na *obrázku 1* je zachyceno mnohočetné využití 3D tisku. [1] [3]



Obrázek 1: Vytisknuté výrobky pomocí technologie 3D tisku. [1]

3D tisk vznikl v roce 1984, kdy si Charles W. Hull nechal patentovat technologii zvanou stereolitografie (SLA). Jako první dokázal vytisknout digitální 3D data a později spoluzaložil společnost 3D Systems, která začala v roce 1992 vyrábět a prodávat první komerčně dostupnou tiskárnu na technologii SLA. [1] [4]

Převratným rokem se stal rok 2005, kdy byl doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap, jehož cílem bylo navrhnout tiskárnu, která si bude umět sama vytisknout co nejvíce vlastních součástí. Do této koncepce se mohl zapojit

každý, kdo měl dobré nápady a rozuměl této koncepci. Díky tomuto projektu jsou RepRap tiskárny nejrozšířenějším druhem tiskáren na celém světě. [1] [5]

S nastupující levnější technologií tisku přišly další možnosti využití, dokonce se umožnilo tisknout pro vlastní použití či dokonce zábavu, vše dle přání zákazníka. 3D tisk může sloužit například pro tvorbu hraček a různých figurek, k výrobě nedostupných náhradních dílů, využití najde ve světě architektury a stavebnictví, ve zdravotnictví, šperkařství a leteckém průmyslu. [1] [6]

2 Vybrané technologie 3D tisku

Všechny technologie 3D tisku fungují na podobném principu, kdy je postupně nanášen materiál vrstvu po vrstvě. Neexistuje žádná technologie, která by byla považována za univerzální a byla tak vhodná pro všechna použití. Je proto nutné pečlivě zvážit, co se bude tisknout a co se od výtisku vyžaduje. [1] [3] [7]

Technologii rapid prototyping (RP – rychlé prototypování), tedy technologii 3D tisku (3DP – 3D printing) lze klasifikovat různými způsoby v závislosti na fyzikálních procesech. Například je můžeme dělit podle zdroje energie, druhu materiálu, velikosti prototypů apod. [2] [7]

Nejčastěji používaným rozdělením 3D tisku je dělení podle výchozí formy suroviny. Výchozí surovinou pro tisk může být látka na pevné, kapalně nebo práškové bázi. V této práci byl blíže studován tisk pevné struny, který zahrnuje proces modelování depozicí taveniny (FDM) a tisk na bázi kapalin, tedy proces zvaný stereolitografie (SLA). [2]

V případě technologie FDM (fused deposition modeling) / FFF (fused filament fabrication) je materiál v podobě tiskové struny extrudovaný (vytlačovaný) tiskovou hlavou skrz rozeřátou trysku. FDM je registrovaná známka firmy Stratasys, takže tyto zkratky lze považovat za synonyma. [1] [5]

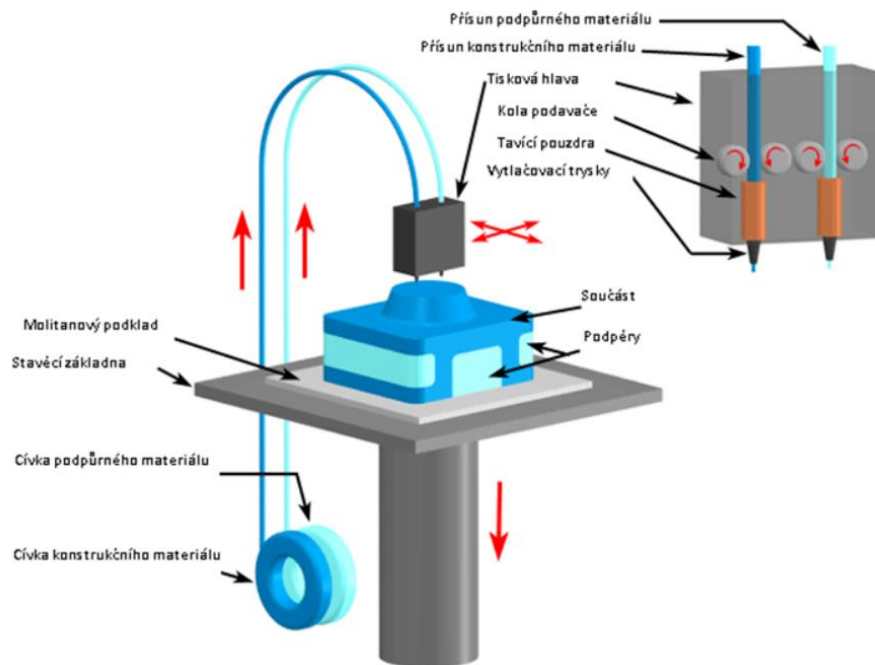
Technologie SLA (stereolitografie) funguje tak, že je tekutý materiál vytvrzován v rámci jedné vrstvy na definovaných oblastech. Materiál je vytvrzován světelným paprskem (UV laser nebo DPL projektor). [1] [8]

2.1 Technologie FDM/FFF

V roce 1988 vyvinul Scott Crump, prezident a generální ředitel společnosti Stratasys Inc., proces tisku FDM (fused deposition modeling). Posláním Stratasysu bylo poskytnout konstruktérům cenově efektivní, ekologicky bezpečná, rychlá řešení pro modelování a prototypování. FDM vytváří 3D modely pomocí procesu vytlačování. Pomocí patentovaných procesů FDM a PolyJet (jinak označováno jako

podkategorie technologie SLA) vytvářejí systémy Stratasys přesné 3D prototypové díly přímo z 3D CAD systémů. Schéma FDM tisku je zobrazeno na *obrázku 2*. [2] [5]

Základním stavebním materiálem je primárně roztavený plast, který je postupně nanášen na sebe, vrstvu po vrstvě. Tiskovým materiálem je zde tisková struna neboli filament, nejčastěji o průměru 1,75 mm. Kvůli menší přesnosti v jeho dávkování bylo postupně opuštěno od průměru 3 mm. Práce s filamentem je oproti pryskyřici nebo jemnému prášku, které se využívají v jiných technologiích jednoduchá a bezpečná. Na výtisku je možné si všimnout patrných tiskových vrstev, jejichž výška se pohybuje v rozsahu 0,05–0,3 mm, při použití nejběžnější trysky o průměru 0,4 mm. [1] [9]



Obrázek 2: FDM/FFF tisk. [9]

Tiskárny na principu FDM lze podle způsobu pohybu v trojrozměrném prostoru rozdělit na další podkategorie. Kartézská tiskárna může k pohybu využívat tři lineární osy, a to znamená, že například tisková hlava vytlačující materiál se může pohybovat ve dvou osách (X, Z) a podložka po jedné (Y), jedná se však o jednu z mnoha možností pohybu. Delta tiskárna tiskne pomocí zavěšeného extrudéru na třech ramenech. Výhodou je velký tiskový prostor a velmi rychlé pohyby. Naopak nevýhodou je poté dodržení vysoké přesnosti při stavbě tiskárny a následné kalibraci, složitá geometrie předpokládá náročné výpočty pro krokové motory každého ramene. Polar tiskárna využívá polárního pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Konstrukčně velmi jednoduchý systém, však provedení a příprava modelu pro tisk je poměrně komplikovaná. [1] [6]

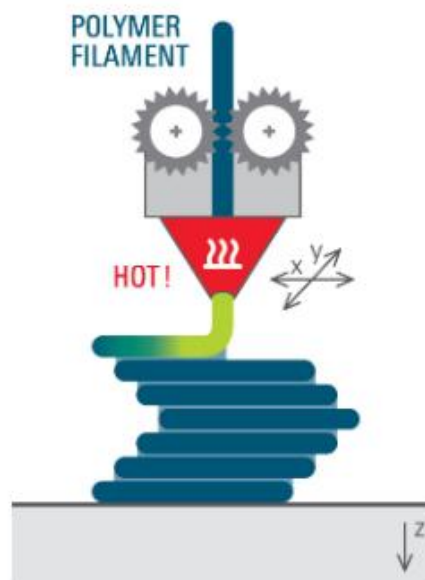
Každá součást tiskárny má svoji specifickou funkčnost. Tisková podložka je rovná plochá deska, na které začíná celý tisk. Cívka s vláknem nese plastové vlákno, které

se postupně natavuje. Na tuto cívku je navinuto tenké vlákno vyrobené obvykle z termoplastu, vlákno slouží jako surovina pro vytvářené předměty. Filamenty různých průměrů není možno zaměňovat. [7]

Soustava, která podává vlákno a posunuje jej topným blokem se nazývá extrudér. Pomocí krokových motorů se posunují pásy a extrudér po osách X, Y a Z (tedy ve směru nahoru a dolů, doleva a doprava, dopředu a dozadu). Rám tiskárny neboli šasi, může být vyroben například z kovu nebo z překližky. Součástí extrudéru je tryska, ze které vytéká roztavený materiál. Pomocí ventilátoru je nutné regulovat tuhnutí každé vrstvy, čímž se zlepšuje úspěšnost ukládání a propojení jednotlivých vrstev. [6] [7]

2.1.1 Princip tisku

Tato technologie 3D tisku je založená na povrchové chemii, tepelné energii a na výrobě pomocí vrstev. Je známá pro svoji spolehlivost a odolnost dílů. Jedná se o vytlačování jemné linie roztaveného termoplastu, které tuhne při pokládání, viz *obrázek 3*. Tiskárny, které pracují s technologií FDM/FFF, vytváří součásti vrstvu po vrstvě nahřátým termoplastem v polotekutém stavu. Jeho pokládání probíhá přesně po vygenerovaných drahách počítačem (tedy po liniích vytvořených daným programem). Používá k provedení tiskové úlohy dva materiály: modelovací materiál, který tvoří hotový kus a podpurný materiál, který slouží jako podpěry pro hotový kus. Filament je vytlačován z tiskové hlavy, která se pohybuje v ose X a Y, kde pokládá materiál, vždy zpravidla po dokončení každé vrstvy se podložka posune v ose Z a začne nanášení další vrstvy. Na konci se vytištěný výrobek s podporami vyjme z přístroje a odstraní se podpory, které je možno rozpustit pomocí určitých prostředků, nebo je vylomit pryč. [2] [3] [10]



Obrázek 3: Princip nanášení vrstev při FDM tisku. [10]

2.1.2 Materiály vhodné pro tisk

Z používaných materiálů pro tisk, tedy z jejich parametrů, vlastností a omezení, je snadnější vytvořit si nadhled o tom, jak tiskárna vypadá a jaké jsou její případné tiskové limity. Hlavní myšlenkou FDM tisku je extrudování materiálu na tiskovou podložku, ve většině případů je tím materiálem právě termoplast, který se vyskytuje ve výchozím stavu v pevném skupenství. Je s ním proto snadnější manipulace než např. s kapalinou. Materiál je dodáván ve formě strun nejčastěji o průměru 1,75 mm. Když se člověk podívá na plastovou špulku, může mu zjednodušeně připomínat strunu do sekačky, viz *obrázek 4*. [5] [11]



Obrázek 4: Filament pro 3D tiskárnu. [11]

Struktura struny je výhodná hned z několika důvodů, oproti jemnému prášku má výrazně menší měrnou plochu a tím se snižuje množství absorbované vzdušné vlhkosti. Obecně však pro všechny materiály určené pro tisk platí, že je vhodné je skladovat v suchém prostředí, protože vlhkost může značně ovlivnit vlastnosti a způsobit problémy s tiskem. [5]

Vlákno, obecně používané pro 3D tisk, může být přirovnáno k „inkoustu“, se kterým pracují běžné 2D tiskárny. Bez filamentu by neměla FDM tiskárna surovinu k tisku. Spotřebitelské 3D tiskárny umožňují tisknout se stále větší škálou různých materiálů. Nejčastěji používaným materiálem je polylaktid (PLA – Polylactic Acid). Jedná se o nejvhodnější surovinu pro tisk touto technologií. [7] [12]

Samotný termoplast, který je ve výchozím stavu pevný, potřebuje teplo, aby se stal tvárným neboli plastickým. Ke změně skupenství jsou třeba předem dané hodnoty a zároveň je nutno dodržet jejich určitý rozsah. Při překročení doporučené teploty bude tiskárna připomínat spíše průtokový ohříváč, v krajních případech může dojít ke spálení filamentu. V praxi se lze setkat s velkým množstvím výrobců filamentu, dokonce i s tuzemskými. Každý filament může mít různé složení, množství pigmentu, bod tání, ale také průměr. Materiály se pak liší

pevností, odolností proti chemikáliím a dalším vlivům. Jejich nabídka se neustále rychle rozrůstá, velcí výrobci se snaží vylepšit jejich vlastnosti či uvést na trh nějaké nové řešení. [2] [5]

2.1.2.1 PLA

Jedná se o naprosto ideální materiál pro začátečníky, je to nenáročný materiál, z kterého je možno vytisknout jakoukoliv geometrii. Polylactic Acid (PLA) se získává z kukuřice nebo z cukrové třtiny, pochází tedy z obnovitelných zdrojů. Výrobci ho často označují jako bio-degradable (rozložitelný/recyklovatelný), avšak není možné jeho pohození do kompostu, je zapotřebí použít patřičný roztok. PLA je skvěle využitelný pro tvorbu prototypů, prakticky nezapáchá a zatím se nepovedlo jednoznačně prokázat zdravotní závadnost v podobě částic uvolňovaných během tisku, je tu tedy možnost použití v dobře větraných kancelářích. [5] [6]

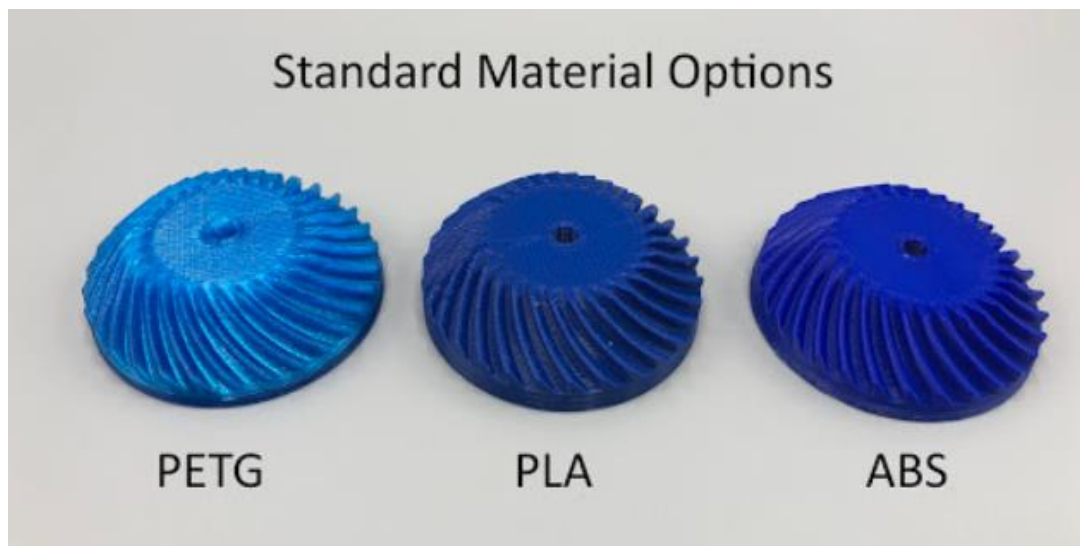
Mezi nedostatky tohoto materiálu patří horší mechanická a teplotní odolnost. Má nízký bod tavení (přibližně 200–215 °C) a také teplotu, při které opětovně měkne (50–60 °C), když tedy materiál zůstane zapomenut v létě na palubní desce auta, sluneční svit ho neponechá v pevném stavu. Dále mu nesvědčí ani UV záření, velmi rychle přijde o pevnost, snadno se tak zlomí či jinak poškodí. Mechanické vlastnosti i teplotní odolnost PLA lze zlepšovat různými technikami. Bohužel však nastává nutnost započítat při návrhu 3D modelu smrštění objektu. [3] [5]

2.1.2.2 ABS

Tento materiál, který byl původně vyvinutý pro použití na vstřikolisu, byl jedním z prvních, který se FDM tiskárny pokusily zpracovat, aby jejich výrobky mohly být více mechanicky namáhané. V tomto ohledu je ABS (tedy Akrylonitril Butadien Styren) výrazně lepší oproti PLA, také má v porovnání s PLA lepší výchozí pevnost a UV odolnost. Pro roztavení potřebuje dosáhnout teploty okolo 250 °C, měkne až od teplot nad 100 °C. Bohužel však ani tento materiál není dokonalý a jeho nevýhody mnohdy převáží pozitiva. Často dochází při chladnutí ke smršťování, kdy se materiál oddělí od tiskové podložky (nadzvedne se), případně popraská na již vytištěném objektu. Na tento fakt musí konstruktér vždy brát zřetel. Je nutno též počítat s větší ztrátovostí a nutností zařadit při tisku větších objektů vyhřívání podložky. Velmi pozitivní vliv má i uzavřená tisková komora, kde je snazší udržet vyšší teploty, tím pádem vznikne menší teplotní rozdíl mezi extrudovaným a již vyextrudovaným materiálem, tento fakt pozitivně ovlivní míru smrštění. [5] [13]

ABS bohužel citelně zapáchá, proto tisk ve společných prostorách dlouhodobě nepřipadá v úvahu. Důležitým faktem je pak skutečnost uvolňovaných částic do vzduchu, které podle posledních průzkumů nemají nejlepší vliv na lidské zdraví.

ABS se tedy používá zejména pro dobrou mechanickou, tepelnou a UV odolnost, lze jej také chemicky vyhladit prakticky do souvislého povrchu. Porovnání výtisků stejného modelu je nejlépe vyobrazeno na *obrázku 5*. [5] [13]



Obrázek 5: Porovnání jednotlivých materiálů pro FDM tisk. [13]

2.1.2.3 PETG

PETG byl vyvinut jako materiál, který má nést podobné vlastnosti jako má ABS, ale měl za úkol vymazat jeho negativní vlastnosti. Ve velké míře se to povedlo a PETG se výrazně lépe tiskne. Tento materiál je znám ve formě plastových lahví, tedy PET – Polyethylene Terephthalate. Oproti již zmiňovanému ABS se méně smrštuje a méně praská, není tak výrazně cítit, a i ze zdravotního hlediska není tolik závadné. Narozdíl od ABS nese o něco horší mechanické vlastnosti, taví se při teplotách okolo 230–240 °C a znovu měkne při teplotě kolem 90 °C. PETG je chemicky odolné a v externím prostředí vydrží déle než PLA, ze základní nabídky těchto tří materiálů je tedy vhodnějším kandidátem, než je výše uvedené ABS. [2] [5]

Největším problémem tohoto materiálu je tzv. stringování, které se projevuje jako viditelné tenké nitě. Objekt pak vypadá, jako by v něm přebýval pavouk a spojoval ho pavučinou. Tento jev je těžké během tisku odstranit, často nezbyvá, než vzít do rukou horkovzdušnou pistoli a výrobek opracovat. Také je nutné před tiskem správně ošetřit tiskovou podložku. Na některých površích, například na skle, výrobek držet nebude, naopak na silně odmaštěných foliích může přilnout natolik, že při sundávání dojde k nevratnému poškození buď objektu nebo i samotné podložky. [5] [13]

2.2 Technologie SLA

Původním vývojářem strojů SLA rapid prototyping byla společnost 3D Systems, Inc. Tato společnost navrhovala zařízení pro výrobu pevných 3D plastových dílů

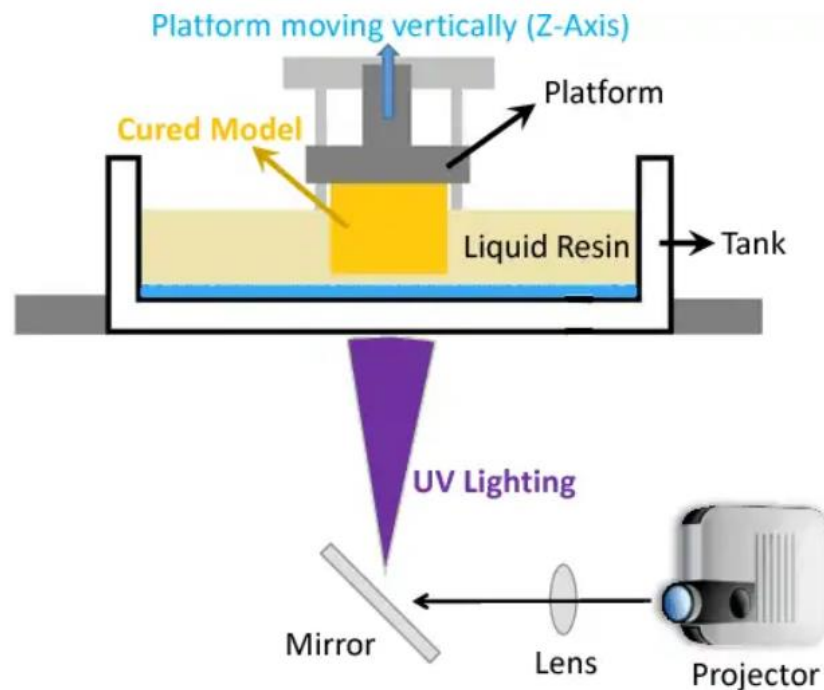
přímo z CAD/CAM dat. Společnost se velmi rychle rozrostla z průkopníka na osvědčeného lídra v oblasti rapid prototyping se stovkami instalací po celém světě. 3D Systems se sídlem ve Valencii v Kalifornii, založená Charlesem Hullem, vynálezcem SLA, slouží zákazníkům po celém světě. Pobočky má rozmístěné ve Spojených státech, ve Spojeném království, Francii, Itálii, Hongkongu, a dokonce i v Japonsku. Zaměstnává více než 300 lidí. [2]

Technologie SLA neboli Stereolitografie je založena na principu vytvrzování světlocitlivé pryskyřice za pomoci světla. Tisková podložka se při každé další vrstvě posune a proběhne vytvrzení fotopolymeru na požadovaných místech. Jedná se o detailnější tisk než v případě FDM tiskáren, trvá však déle a tisková plocha je menší. Uplatnění těchto tiskáren je především v medicíně a ve šperkařství. Na vytištěném výrobku nejsou tak patrné vrstvy materiálu, tisk je téměř ideálně hladký a detailní. Mezi nevýhody této technologie patří již zmiňovaná menší tisková plocha, a především toxicita pryskyřice. Kontakt pryskyřice s pokožkou je nutno co nejdříve předcházet, jako též vdechování výparů během tisku. [1] [3]

Vytištěný model není vhodný pro okamžité použití, z důvodu znečištění nevytvrzenou pryskyřicí na povrchu, proto je model na povrchu lepkavý, tudíž vzniká nutnost model namáčet v izopropylalkoholu, aby se zbytek pryskyřice smyl. Navíc je doporučeno výrobek dodatečně vytvrdit UV světlem. Všechny tyto úkony se musí provádět velmi obezřetně, minimálně v ochranných rukavicích. O tyto úkony se v dnešní době nejlépe postará samostatný přístroj, který zajistí mytí i vytvrzení zároveň. [1]

V běžné praxi existují tři hlavní kategorie SLA procesu, lišící se způsobem osvit a vytvrzováním fotopolymeru. Na první pohled se mohou zdát podobné, ale kvalita a doba tisku se může výrazně lišit. První kategorii zastupuje tisk pomocí SLA laseru, osvit probíhá za pomoci UV laserového paprsku, kdy je paprsek směřován dvěma zrcadly a postupně vykresluje tiskovou vrstvu. U této technologie je možno říct, že doba tisku je závislá na ploše, která se v dané vrstvě vytvrzuje. Další kategorii zastupuje tzv. DLP (Digital Light Processing), kde probíhá osvit celé tiskové vrstvy najednou, za pomoci digitálního projektoru. Tam, kde dochází k osvit, zároveň dochází k vytvrzení. Princip je vyobrazen na *obrázku 6*. Mezi hlavní výhodu patří nezávislost doby tisku jedné vrstvy na počtu tištěných objektů a jejich ploše k dané vrstvě. Tím, že tiskový čas jedné vrstvy je fixní, jeden model se bude tisknout stejně dlouho jako dva nebo tři modely. Třetí, tedy poslední kategorií SLA tisku je technologie MSLA (Mask Stereolithography), kde dochází k osvit za pomoci UV LED a maskování celé vrstvy LCD displejem. K vytvrzení pryskyřice dochází jen tam, kde jsou pixely aktivované (svítí bíle), jen tam může totiž prostoupit UV světlo. LCD displej se obecně skládá ze čtvercových pixelů o pevně daném rozlišení, proto je rozlišení objektu v osách X a Y pevně

dané rozlišením LCD displeje. I tato technologie je díky vytvrzování celé vrstvy najednou časově nezávislá na počtu tištěných objektů, tiskový čas jedné vrstvy je stále stejný. [1] [2] [14]



Obrázek 6: Způsob tisku pomocí technologie SLA. [14]

Stejně jako u tiskáren FDM může mít tiskárna SLA různé druhy konstrukce, převážně podle toho, jakým způsobem je docíleno selektivního vytvrzování tiskové vrstvy, v závislosti na tom se mění i některé její komponenty. Pro vytvrzení pryskyřice osvětlením během několika málo vteřin je nutnou součástí tiskáren SLA vysoce výkonná UV dioda, která osvětluje během vytvrzovacího procesu celou tiskovou plochu bez rozdílu. Kvalitně zpracovaný LCD panel umožňuje u jednotlivých pixelů určovat, kterými UV světlo projde a kterými nikoliv. Ovládací displej tiskárny slouží pro uživatelskou obsluhu tiskárny. Součástí každé tiskárny musí být též vanička, která slouží jako zásobník tekutého tiskového materiálu. Její dno je průhledné, aby zde mohlo procházet UV světlo. K mechanickému posuvu dochází pouze ve směru osy Z, zbylé osy nejsou nutné. Průhledný kryt typicky zbarvený do červena, omezuje přístup UV světlu ze slunečního svitu směrem do tiskárny a také zabraňuje tomu, aby UV světlo vyzařované diodou nevycházelo směrem ven. Také zamezuje šíření výparů z pryskyřice do okolí. Nepříjemný zápach pak může být eliminován za pomoci filtru. Masivní hliníkový rám zajistí stabilitu a tuhost celé konstrukce tiskárny, za předpokladu použití měkkého rámu může docházet ke kroucení a negativnímu ovlivnění kvality a spolehlivosti tisku. [1] [4]

2.2.1 Princip tisku

Tiskárny na principu SLA nepracují s vláknem, nýbrž pracují s kapalnou pryskyřicí (polymerem), který tvrdne při vystavení ultrafialovým paprskům. Tyto tiskárny též tvoří své výtisky po jednotlivých vrstvách, ale poněkud jiným způsobem. Základní proces tisku vypadá následovně. Do 3D tiskárny je umístěna vana s kapalnou pryskyřicí a zásadní změna nastává v tom, že tisková deska je orientována směrem dolů a mezi dnem vany a deskou je na začátku jen velmi malá vrstva pryskyřice. Ze spodní strany 3D tiskárny dopadají na tiskovou desku speciálně směřované paprsky, které v předem určených místech pryskyřici vytvrdí. Deska se postupně sune mírně nahoru a každé následující vrstvy se na sebe po vytvrzení připojí. Tento proces se neustále opakuje, dokud není objekt hotový. [7] [15]

2.2.2 Materiály vhodné pro tisk

V souvislosti s materiálem pro tisk na 3D tiskárnách se můžeme setkat s pojmem resin, který pod sebou nese označení jako fotopolymer nebo světlocitlivá pryskyřice. Je to tekutý materiál, který se vytvrzuje světelným paprskem. Tisk z resinu je rozhodně dražší než tisk z filamentu. Obecně lze říci, že výtisky z resinu jsou křehčí než modely tištěné technologií FDM, ale naopak SLA výtisky nepraskají po vrstvách, lámou se totiž podobně jako sklo. Resiny se skládají ze tří hlavních složek, a to z jádra pryskyřice (monomerů), fotoiniciátorů (molekul, které iniciují reakci vytvrzování) a přísad (mění vzhled a charakteristiky). Materiály se rozlišují podle účelu, pro který jsou určeny, a ne dle typu materiálu, jak je tomu u FDM tisku. Resin je ve své podstatě jenom jeden. Rozdíly se nachází pouze ve vzhledu, stupni tvrdosti a houževnatosti. [1] [2] [14]



Obrázek 7: Způsob tisku a ukázka materiálů pro tisk metodou SLA. [16]

Stereolitografie je velmi oblíbená z důvodu výroby s velmi vysokým rozlišením a přesností. Díky různým typům pryskyřic si našel tento proces mnoho aplikací v různých odvětvích. Ukázka využitelnosti viz *obrázek 7*. Různé kombinace monomerů, oligomerů, fotoiniciátorů a různých dalších přísad, které obsahují pryskyřici, vedou k různým materiálovým vlastnostem. Pryskyřice přináší vážná zdravotní rizika, která mohou vzniknout, pokud se nevytvrdí, naštěstí však pod UV světlem pryskyřice špatné vlastnosti ztrácí a může být použita na součásti každodenní potřeby. Podle použití můžou být pryskyřice rozděleny například takto, standardní pryskyřice se používají pro obecné použití, například pro prototypování. Technické pryskyřice mají své specifické mechanické a tepelné vlastnosti. A v neposlední řadě zubní a lékařské pryskyřice mají certifikáty biokompatibility. [8] [16]

2.2.2.1 Standardní pryskyřice

Standardní pryskyřice jsou ideální pro prototypové aplikace, vytvářejí výtisky s vysokou tuhostí a vysokým rozlišením s hladkým povrchem podobným vstřikováním. V tomto případě barva pryskyřice ovlivňuje její vlastnosti, například šedá pryskyřice je vhodnější pro díly s jemným detailem a bílá pryskyřice pro díly vyžadující velmi hladký povrch, čirá je nejpevnější a tak podobně. Naopak je ale velmi křehká, s nízkou teplotní odolností a nízkou rázovou houževnatostí. Hojně se využívá pro koncepční modelování, rychlé prototypování, umělecké modely, krabičky, sošky, různé věšáky a držáky. [8] [14]

Čirá pryskyřice si zakládá na podobných vlastnostech jako ta standardní, ale lze jí dodatečně zpracovat na téměř optickou průhlednost. Má dobré vlastnosti a vysoké detaily, oplývá hladkou povrchovou úpravou a průhledností. Oproti tomu má nízkou rázovou houževnatost, křehkost a optickou čirost může v průběhu času měnit. Je vhodná pro jakékoliv vnitřní součásti, kryty na displeje nebo LED, průhledy či světlovodivé části. [8]

2.2.2.2 Epoxidy

Nejstěžejnější vlastností epoxidové pryskyřice je její hladký povrch. Umožňuje docílit zhotovení přesných drobných detailů jako jsou mřížky, rýhy, zkosení, výstupky, přesné otvory a tvarové přechody. Pružnost zaručuje obrovskou flexibilitu v tvorbě tvarově různorodých výrobků, kde není limit v podobě jednoduchých geometrických těles, ale je možné vytisknout prakticky cokoli na základě výpočtů, včetně integrálních funkcí. Snadno lze pak získat model ozubených kol, kde se dají uplatnit evolventy a cykloidy, anebo lopatková kola modelů turbín či lodních šroubů. Výsledkem je pak mnohem přesnější výroba, než kdyby se jednalo o odlitky. [14] [17]

Epoxidovou pryskyřici lze použít i pro velmi přesné modely s ostrými hranami a přechodovými liniemi, které jsou takřka neznatelné. Nejčastějším důvodem k použití pryskyřic je výroba forem pro vstřikování či odlévání různých materiálů a hmot. Také je vhodné použít je pro tvorbu bezpečnostních krytů a pro měkčí a pružnější výrobky. [17]

2.2.2.3 Plněné pryskyřice

Tento druh pryskyřic bývá vždy vyztužen nějakým podpurným materiálem, v nejčastějších případech sklem, ale mohou být použity též keramické částice. Výsledkem jsou velmi pevné a tuhé díly s velmi hladkou povrchovou úpravou. Nabízejí dobrou tepelnou stabilitu a tepelnou odolnost. Mají vysoký modul pružnosti a nižší tečení, což představuje vyšší odolnost vůči deformaci v průběhu času. Ve srovnání s jinými pryskyřicemi jsou křehčí. Pro díly s tenkými stěnami a malými prvky je nejvhodnější keramikou plněná pryskyřice. Mezi nevýhody patří nízká rázová houževnatost. Hodí se pro tvorbu forem a nástrojů, přípravků, rozdělovačů a pouzder pro elektrické a automobilové aplikace. [8] [18]

Rozdíly mezi kvalitou výtisků jsou ohromné, porovnání technologií FDM a SLA na první pohled zobrazuje *obrázek 8*. [18]



Obrázek 8: Porovnání kvality výtisků technologií FDM a SLA. [18]

3 Druhy tiskáren

Se stále se zvyšující dostupností a kvalitou 3D tisku se na trhu objevuje velké množství výrobců, vynálezců, umělců i běžných spotřebitelů, kteří se obracejí k využívání systémů 3D tisku a rychlého prototypování, aby mohli přenést své nápady do fyzického světa. Odvětví 3D tisku překonalo za posledních pár let několik velkých milníků, z nichž mají v důsledku tiskárny širokou škálu využití a schopností. Díky tomuto je však na výběr z velké nabídky strojů a technologií. Rozhodování tudíž může být celkem náročné. [2]

Tiskárny se dají rozdělit do více kategorií, krom rozdělení dle technologie tisku se dají dělit na druhy podle způsobu použití v praxi. Podle tohoto rozdělení existují tiskárny stolní (*obrázek 9*), produkční a průmyslové. Jak již z názvů vyplývá, stolní slouží pro použití například v domácnostech, produkční v menších provozech a průmyslové ve velkých výrobních firmách, kde se tisknou například větší výrobky. [19] [20]



Obrázek 9: Stolní 3D tiskárna MakerBot Replicator+. [20]

Při pořizování stolní 3D tiskárny na bázi FDM je na výběr z tzv. open source řešení, tedy kdy je možnost si tiskárnu sestavit podle veřejně přístupné technické dokumentace, nebo existuje též tzv. uzavřené (komerční) řešení, kdy uživatel obdrží zkompleťovaný stroj. Při sestavování vlastní tiskárny je dostupných mnoho náhradních dílů, dokonce je i možnost si je vytisknout. Dalším kladem je zde bohatá nabídka materiálů (filamentů) pro tisk. Bohužel tento způsob pořízení tiskárny přináší i problémy, jedním z nich může být např. detailní nastavení tisku, kvůli docílené kvalitě. Z důvodu horší kvality je proto nutné model vytisknout i opakovaně. Správné nastavení parametrů vyžaduje již nějaké zkušenosti. Naopak komerční tiskárny se snaží práci co nejvíce ulehčit, software pro přípravu tisku je hodně propracovaný. Tiskový materiál je přesně sladěn s možnostmi

tiskárny, nejvíce si tohoto faktu uživatel všimne při odstraňování podpor, kdy se určitě nestane, že by se podpory připekly k modelu nebo během tisku zbotily. [13] [19] [21] [22] [23]

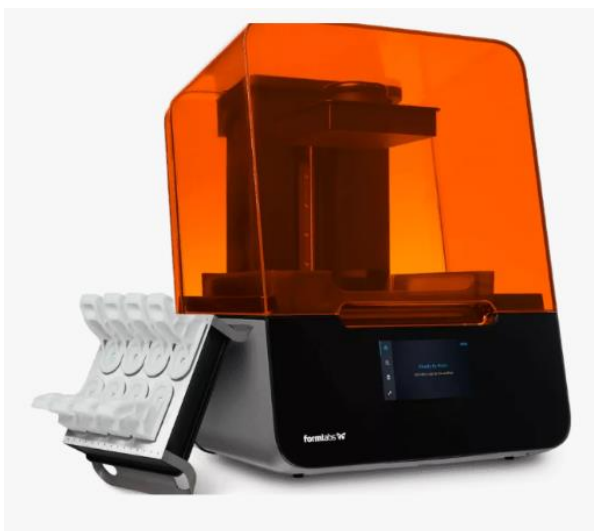
Tato práce se zaměřuje pouze na technologie tisku FDM a SLA, ze kterých vychází v dalších kapitolách. V následujících návrzích pracovišť se pracuje s tiskárnami pro FDM tisk, a to konkrétně se dvěma zástupci s konstrukcí otevřenou (obrázek 10) a pak také s jedním zástupcem řady s konstrukcí uzavřenou (obrázek 11). Dále jsou zde dva zástupci technologie SLA, jeden model stolní tiskárny (obrázek 12) a druhý větší, průmyslový (obrázek 13). [24]



Obrázek 10: Original Prusa i3 MK3S+. [21]



Obrázek 11: 3D tiskárna Stratasys F370. [22]



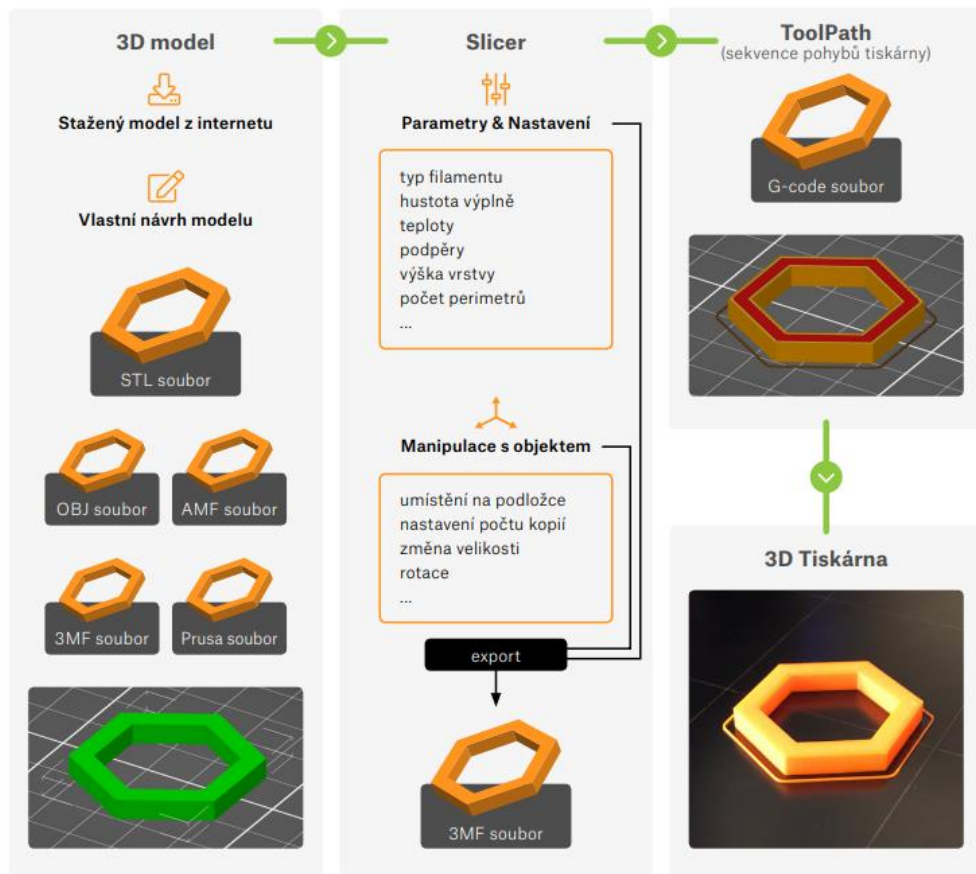
Obrázek 12: Formlabs Form 3+. [23]



Obrázek 13: Stratasys Neo 450. [24]

4 Rozdělení jednotlivých pracovišť

Proces 3D tisku je možno rozdělit na tři hlavní, na sebe navazující kroky, bez rozdílu použití různých technologií tisku. Prvním úkonem je obstarání samotného modelu, který bude později vytištěn, je nutné jej připravit pro tisk a v neposlední řadě vytisknout. Nejčastěji používaným formátem pro modely je přenosový formát STL, tento formát je však pro tiskárnu nesrozumitelný a nelze za jeho pomoci tisknout. Novějším formátem pak může být například .3mf, který může nést i informace o tiskových parametrech. STL soubor poté slouží jako vstup pro program zvaný obecně slicer. Některé slicery podporují i import STEPu a též primárně konstrukční softwary mohou mít nadstavby pro 3D tisk, takže jsou schopné pracovat také s nativními formáty, patří sem např. SolidWorks, NX apod. Dalšími vstupními parametry do sliceru mohou být nastavení a parametry určující kvalitu tisku, teploty, chlazení atd. Slicer slouží jako takový převodník formátu STL do formátu G-kódu (jeden z formátů, nepoužívají ho všechny slicery a tiskárna), který rozporcuje model na tenké vrstvy a vytvoří cesty extruderu v jednotlivých vrstvách. Také do souboru přidá informace o požadovaném nastavení teplot, chlazení a další parametry. Takovýto soubor je již specifický pro konkrétní typ tiskárny, proto jsou 3D modely šířeny nejčastěji ve formátu STL a každý uživatel si musí model upravit podle svých potřeb v závislosti na použitém materiálu a tiskárně. Jednotlivé kroky jsou zobrazeny na obrázku 14. [1] [3] [15]



Obrázek 14: Diagram jednotlivých kroků během celého procesu 3D tisku. [1]

Všechny díly, které jsou vyráběny v současném i vyvíjejícím se procesu 3D tisku, mají několik společných znaků, které se provádějí během výrobního procesu. Nejprve je nutné vytvořit pevný nebo plošný CAD model vyráběného dílu a poté jej elektronicky rozdělit na vrstvy předem stanovené tloušťky pomocí speciálního softwaru. Tyto vrstvené příčné řezy společně definují tvar výtisku. Informace o každém řezu jsou poté elektronicky přenášeny vrstvu po vrstvě do stroje. 3D tiskárna zpracovává materiál pouze na „pevných“ plochách řezu. Následující vrstvy se postupně zpracovávají vždy jedna po druhé, dokud není díl kompletní. Právě tento sekvenční vrstvený přístup k výrobě dílů definuje 3D tisk. Proces 3D tisku v zásadě používá k výrobě 3D fyzických dílů následujících pět základních kroků: [2] [6]

1. vytvoření návrhu CAD modelu
2. konverze CAD modelu do formátu souboru STL
3. rozdělení souboru STL na jednotlivé vrstvy (2D řezy)
4. vytváření prototypu (samotný průběh tisku)
5. postprocessing [2]

Následující podkapitoly se specializují na jednotlivé rozložení úkonů při 3D tisku. Kdy je nutné co udělat, co použít, případně jak si poradit s nastalými problémy, jsou zde také určitá doporučení k hladšímu průběhu tisku.

4.1 Předpřípravy a zásady správného tisku

Prvním krokem při přípravě tisku je získání 3D modelu, který lze získat třemi způsoby. Nabízí se možnost stažení hotového modelu z internetu, vymodelování vlastního modelu či 3D skenování již existující věci. Tím nejsnazším způsobem, jak začít s 3D tiskem, je najít volně dostupné 3D modely na internetu, a to nejlépe rovnou ve formátu STL. Databází s modely existuje celá řada, dá se v nich najít nepřeberné množství hotových modelů od tvůrců z celého světa. Mezi nejoblíbenější volně dostupné webové portály patří PrusaPrinters, Thingiverse, YouMagine. [1] [6]

Během návrhu a modelování je dobré mít na paměti hned několik zásad. Určitě je potřeba minimalizovat podpěry. Vhodným návrhem a modelováním lze docílit malého množství podpěrného materiálu, díky kterému se šetří jak materiál, tak tiskový čas a v některých případech lze docílit i lepšího povrchu. Nejdůležitějším parametrem zůstává, že 3D tiskárna není schopna tisknout do vzduchu. Z tohoto důvodu je též důležité dobře rozmyslet samotnou orientaci modelu na podložce, plochy umístěné na podpěrách nebudou tak hladké a rovné jako plochy umístěné na podložce, ale budou potřebovat povrchovou úpravu. Výtisk má menší pevnost

ve směru rovnoběžném s vrstvami než kolmo na vrstvy, toto je třeba zohledňovat u dílů, u kterých uživatel očekává velkou pevnost. Pokud je požadována velká přesnost a co největší kvalita povrchu, měl by uživatel zvážit rozdělení modelu na více částí a ty na podložce natočit co nejhodnějším způsobem. [1]

3D skenování a fotogrammetrie (způsob založený na sérii fotografií z různých úhlů pohledu, které jsou následně za použití počítačového programu zpracovány) slouží k převodu reálného předmětu do počítačového modelu. [1]

4.2 Příprava tisku

Před samotným tiskem je nejdůležitější zvolit správně materiál, ze kterého se bude výrobek tisknout. Na výběr je hned několik typů tiskáren, jak již bylo zmiňováno v předešlých kapitolách této práce. Nejen pro stolní tiskárny je výběr materiálů opravdu široký. Základním materiálem pro FDM technologii je plast PLA, který má nízkou tepelnou roztažnost a relativně nízký bod tání. Oproti tomu u ABS plastu, který je pevnější, musí uživatel více dbát na přilnutí k podložce. Dalším často používaným filamentem je PVA (polyvinylalkohol), jedná se o vodou rozpustnou podpurnou konstrukci vhodnou pro duální tisk, viz *obrázek 15*. Tento druh tisku je v podstatě založen na tom, že je tiskárna schopna tisknout střídavě ze dvou různých materiálů v průběhu jednoho tisku. Dochází tedy k tisku dvoubarevných modelů, nebo k využití PVA jako podpory, kterou lze po dokončení odstranit ve vodní lázni. Lze se tu setkat s nepříjemnou komplikací v podobě špatné přilnavosti plastu PVA na PLA, proto je tedy nutné předimenzovat (navýšit) počet PVA podpor, aby se dostatečně přichytily k PLA podkladu. [12] [25] [26]



Obrázek 15: Rozpustné podpory z PVA. [26]

Volba materiálu však není jen o barvě, je třeba se zaměřit především na jeho fyzikální vlastnosti vzhledem k předpokládanému použití budoucího výtisku. U některých materiálů je tisk snazší a velmi detailní, avšak teplotní odolnost je

nížká, toto nastává, u již zmiňovaného PLA, oproti tomu ABS se chová naprosto opačně. Ještě před samotným tiskem je nutné převést 3D model na strojový kód (G-kód). Pro přípravu G-kódu je nutný nejenom 3D model, ale také řada nastavení, která mají vliv na kvalitu, pevnost a dobu tisku. Modely je možno modifikovat, zmenšovat či zvětšovat velikost, otáčet podle os, řezat či rozdělovat na separátní objekty. Za pomoci programu je možno též rozmístit jednotlivé modely po tiskové ploše. [1]

Po zvolení vhodného materiálu je nutná příprava podložky, která se skládá ze tří nejdůležitějších kroků. Pro správný tisk je zásadní kalibrace podložky. Tiskový podklad musí být vyrovnaný tak, aby mezi tryskou a podložkou byla ideální mezera, uvádí se, že přibližně na velikost vizitky, a to po celé ploše podložky. Při špatně provedené kalibraci může být první tištěná vrstva buď moc nízká anebo vysoká. Nízká mezera může zavinit řadu problémů, například nerovnost první vrstvy, či narušení materiálu poháněcím ozubeným kolečkem. Naopak při příliš velké mezeře mezi tryskou a podložkou se mezi sebou jednotlivé vrstvy horizontálně nespojí a povrch nebude hezký a s největší pravděpodobností nebude nejspíš ani držet na podložce. V dnešní době mají tiskárny automatickou kalibraci prováděnou před každým tiskem, ruční kalibrace je proto nutná jen po přemístování tiskárny, nebo po manuálním zásahu do podložky. [1] [12] [25]

Dalším důležitým parametrem je správné zvolení teploty podložky, kterou se zajistí lepší přilnavost první vrstvy. Tiskové teploty jsou definovány především zvoleným materiálem, tyto teploty jsou vždy napsané na zakoupeném materiálu. Lze na trhu objevit i modely bez vyhřívání podložky, což zamezí tisk z některých materiálů. Podložka může být vyhřívána buď lokálně nebo plošně, při lokálním vyhřevu je rozhodně jedna strana podložky chladnější, než je tomu u zdroje, je tedy lepší rovnou sáhnout po celovyhřívání podložce, aby se model nezkroutil a případně úplně neodlepil. Bohužel vyhřívání někdy pro úplnou přilnavost nestačí, proto je nutné podložku povrchově upravit. Při tisku z PLA je u určitého typu podložek nutné povrch namazat obyčejným tubovým lepidlem na papír. Při tisku ABS je poté nutno použít rozpouštědlo aceton, které první vrstvu naleptá a na povrchu podložky ji spolehlivě udrží, tento postup ale není univerzální pro všechny druhy podložek. [12] [25]

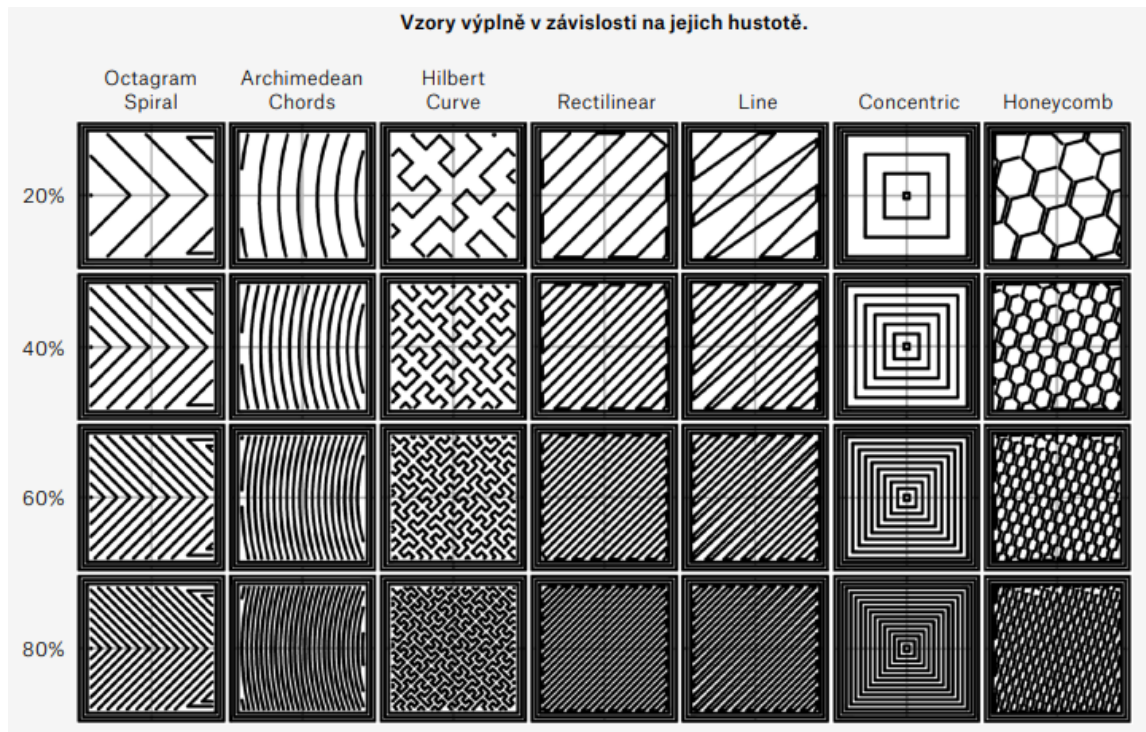
Správně připravený povrch tiskové podložky je klíčový pro úspěšný tisk. Dříve se tisklo na sklo či zrcadlo, kdy se pro zvýšení adheze používal především lak na vlasy, takzvaný ABS juice, což jsou vlastně rozpuštěné zbytky ABS v acetonu. Dále se používala kaptonová páska a tyčinkové lepidlo na papír. Práce s tiskárnou tak nebyla moc snadná. Po příchodu povrchu v podobě PEI folie se vše změnilo. Povrch s touto úpravou není třeba nijak zvláště před tiskem upravovat, pouze je nutné zajistit jeho odmaštění. Drží na něm velmi dobře většina dostupných materiálů. Tyčinkové lepidlo zůstalo stále jako součást výbavy, ale nyní už jen jako separační vrstva mezi podložkou PEI a výtiskem z materiálu PET, kde by naopak

přilnavost mohla být extrémní a bylo by obtížné model sundat z podložky bez jejího poškození. [1]

Po výběru všech dosavadních kritérií je možné přistoupit k přípravě samotné 3D tiskárny. Tiskárna musí být vždy umístěna ve vodorovné a stabilní poloze. Žádný obecný návod na sestavení a nastavení tiskárny bohužel není, vždy lze konkrétní návod nalézt v balení zvoleného modelu tiskárny. Před prvním tiskem a pak také po každé fyzické manipulaci s tiskárnou se musí spustit kalibrace, která otestuje, zda je tiskárna připravena k použití. Jedná se zejména o vynulování os X, Y a Z. Poté také nastavení správné polohy trysky těsně nad povrchem nahřáté podložky. Jakmile je tiskárna správně zkalibrována, je důležité správně nastavit parametry pro daný tisk. Přijít na správné nastavení nové 3D tiskárny, aby výtisk byl opravdu kvalitní, může trvat, nejen začátečníkům, opravdu dlouho. Chytřejší tiskárny si parametry nastavují automaticky dle vstupního materiálu. [25]

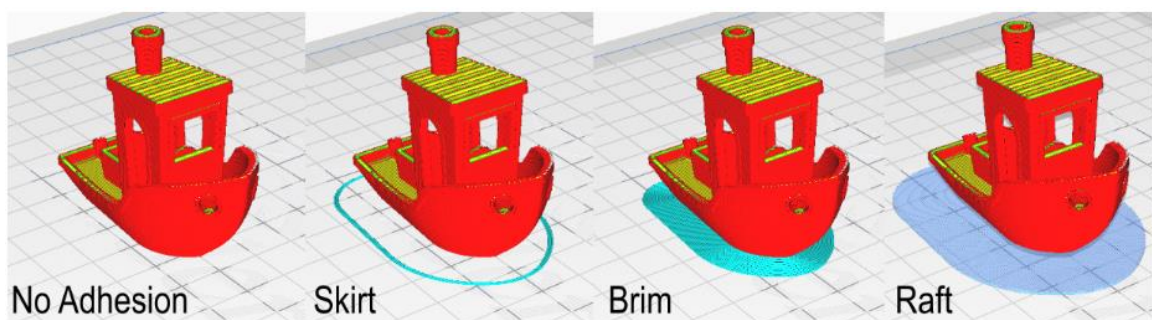
Nejdříve je důležité nastavit již zmiňovanou teplotu filamentu a podložky, teplotní rozsah pro konkrétní typ filamentu udává každý výrobce sám. Těmito úpravami teplot se budou měnit především vizuální vlastnosti výtisku. Teplota trysky se pohybuje v rozmezí 200–240 °C a teplota podložky od 60 °C do 100 °C. Dalším velmi důležitým parametrem je nastavení výšky vrstvy, která výrazně ovlivňuje dobu tisku. Čím je výška vrstvy vyšší, tím více jsou jednotlivé vrstvy patrné, tento jev je nejvíce viditelný na plochách, které jsou skoro rovnoběžné s tiskovou plochou. Nejčastěji se uživatelé mohou setkat s výškou vrstvy 0,15 mm. Nižší vrstvy jsou voleny proto, aby se dosáhlo detailnějšího výtisku, zároveň se však prodlužuje tiskový čas, kompromisu lze dosáhnout tím, že ve složitých místech modelu, kde je požadován větší detail, zvolí uživatel výšku vrstvy menší než ve zbytku modelu, který neobsahuje tak náročné detaily. [1] [6] [25]

Perimetry jsou obvodové stěny modelu, nastavuje se zde jejich počet. Výsledná stěna pak bude mít šířku přibližně: počet perimetrů x průměr trysky. Plné vrstvy lze nastavit za pomoci počtu spodních a vrchních vrstev. Výplň je též velmi důležitým nastavením. Ovlivňuje dobu tisku, pevnost výtisku a spotřebu filamentu. Při volbě výplně se nastavuje procentuální hodnota (může být 0% pro duté objekty a přibližně 10–20% pro běžné výtisky), je možné si též zvolit vzor výplně, viz *obrázek 16*. Podpěry umožňují tisknout části modelu, které by jinak visely ve vzduchu, nebo by je zkrátka nebylo možné vytisknout vůbec, například svírají s podložkou úhel menší než 45°. Po vytištění jsou podpory následně odlomeny či rozpuštěny, nebo odstraněny i jinými způsoby. Množství podpěr by se mělo co nejvíce minimalizovat, respektive použít pouze jejich nezbytně nutné množství, aby byl tisk úspěšný. Při menším množství podpěr bude tisk rychlejší a také bude menší spotřeba materiálu. [1] [2] [6]



Obrázek 16: Vzory výplně v závislosti na jejich hustotě. [1]

Jediným případem, kdy lze tisknout takzvaně „do vzduchu“ bez použití podpěr je za použití přemostování (funkce bridging). V tomto procesu dochází k tahání tiskových vláken mezi dvěma body o stejné výšce, most tedy musí být rovnoběžný s tiskovou plochou. Brim udává šířku límce, který bude vytištěn okolo objektů v první vrstvě. Dotýká se objektů a je vhodný ke zvýšení přilnavosti tištěného objektu k podložce, po vytištění celého objektu se odlomí. Skirt se na rozdíl od brimu nedotýká a netiskne se v první vrstvě. Nejčastějším použitím je v případě tisku materiálem ABS, který se při chladnutí významně smršťuje a má tendence praskat. Při přidání skirtu se okolo objektu vytvoří mikroklima a kolem objektu přestane proudit chladný okolní vzduch. V případě funkce raft se jedná o typ podpěry, která se nachází pod celou kontaktní plochou modelu s podložkou. Model tedy neleží přímo na podložce, ale je zvednutý o definovanou výšku raftu. Primárním použitím je při tisku ABS, zamezí se tak kroucení výtisku a zvýší se jeho přilnavost k podložce. Zobrazení těchto funkcí je vyobrazeno na obrázku 17. [1] [6]



Obrázek 17: Přilnavost výtisku za pomoci různých nástrojů. [6]

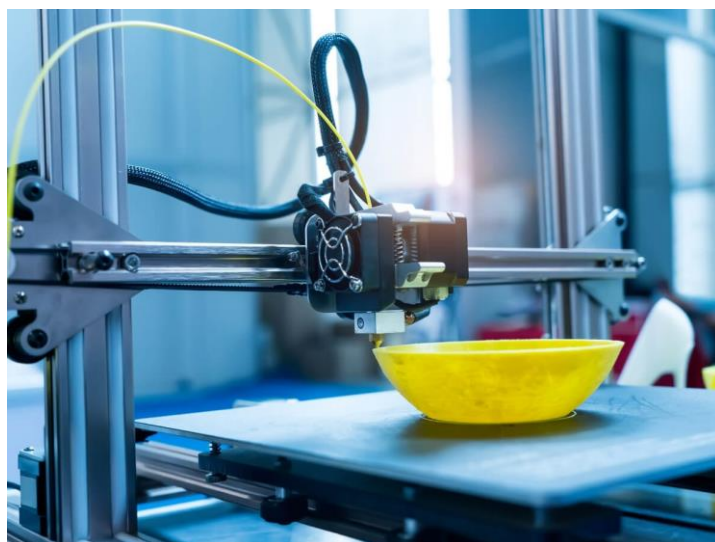
V neposlední řadě je nutné nastavit na tiskárně správné chlazení. Chladit model během tisku je vhodné v případech, kdy je tiskový čas vrstvy velmi malý a předchozí vrstva se nestíhá dostatečně samovolně ochladit a ztuhnout. Typicky se jedná o vysoké a úzké modely. Mezi další nastavitelné parametry patří také rychlost tisku perimetrů, výplní, mostů apod. Tato nastavení bývají již odladěna a dostupná v podobě tiskových profilů od výrobce tiskárny, ve většině případů do nich proto není třeba zasahovat. [1]

Posledním krokem pro přípravu tiskárny je zavedení filamentu do tiskové hlavy. Nejprve je nutné zcela odstranit starý filament. Poté se přehřeje tisková podložka i tryska, umístí se filament na cívku a ustříhne se mu špička. Nakonec stačí jen zadat příkaz k zavedení filamentu a motor filament sám zavede do hlavy. [25]

4.3 Tisk jako takový

V závěru přípravy tisku je nutné zadání instrukcí, vytvořených slicerem, tiskárně. Výstup ze sliceru se nahraje například na SD kartu, vloží se do tiskárny a zadá se samotný tisk, průběh viz *obrázek 18*. Jedná se o nejčastější způsob přenosu dat do tiskárny, některé slicery však dovolují tisk přímo přes USB kabel nebo také po síti, na dálku. Nejdříve se nesmí zapomenout zkontrolovat, zda je v zásobníku dostatečné množství filamentu a také nesmí být tiskárna dlouho přehřátá, aby se neucpaly trysky. Ideální je tiskárnu alespoň prvních pět minut sledovat a kontrolovat, zda vše probíhá tak, jak má. Po ukončení tisku je někdy nutné výtisk odlepit špachtlí nebo jiným podobným nástrojem. [25] [4]

Doba tisku se liší v závislosti na velikosti, počtu požadovaných dílů a celkově na nastavení použitého stroje. Při 3D tisku je však tento čas spíše v řádu hodin až dní než minut, nejedná se tedy o úplně nejrychlejší technologii. [2]



Obrázek 18: Průběh 3D tisku za použití technologie FDM. [4]

4.4 Post-processing

Posledním krokem ve výrobním procesu je postprocessing, což představuje odstranění přebytečných materiálů a čištění dílů. U různých produkčních stylů to také někdy vyžaduje vytvrzení předmětu, jako je tomu například u tisku technologií SLA. Tento krok často vyžaduje speciální znalosti, aby se zajistilo, že díl nebude poškozen. V opačném případě může být součást poškozena a musí být vyrobena znovu. U různých typů systémů a druhů 3D tiskáren se čištění, následné vytvrzování a konečná úprava liší. [2] [27]

Čištění výtisků po technologii FDM zahrnuje odstranění podpůrných materiálů a přebytečného vlákna například broušením. U výtisků technologií SLA to zahrnuje očištění přebytečných pryskyřic a stažení všech podpůrných materiálů. Úkoly následného vytvrzování jsou tedy potřebné pouze pro díly SLA. U dílů vyrobených SLA jsou předměty vloženy do čistící lázně (lihové) a poté se ponechají na místě s mírným UV zářením, aby se dokončilo vytvrzení. Dokončování dílu se provádí, jakmile je díl vytvrzen nebo vyčištěn. Dokončování dílu může zahrnovat další kolo broušení nebo úplné odstranění přebytečného materiálu, nebo třeba přidání ochranného krytu na předmět, aby nedošlo k jeho pozdějšímu poškození. U dílů, které jsou tištěny technologií FDM nebo SLA je žádoucí natřít objekty pomocí akrylové barvy, aby uživatel získal požadovaný vzhled výrobku. [2]

Výtisky je možné ve většině případů ihned po vytištění použít jako funkční díly, pokud jsou ale dány vyšší nároky na vzhled výtisku, nastává takzvaný postprocessing. Tento pojem zahrnuje celou řadu technik a dílčích prací na modelu s obecným cílem získat hladký, barevný a hezky vypadající povrch modelu. Modely z plastu lze ručně brousit (elektrické vysokootáčkové nástroje vedou spíše k tavení plastu než k jeho broušení), kytovat karosářským tmelem, stříkat plničem, laminovat, malovat akrylovými barvami, stříkat barvou ve spreji atd. Při nanášení tmelu či kytu ve větší vrstvě je nutné počítat se ztrátou detailů na modelu. [1]

Po vytištění je vhodné model nejprve složit a slepit ho, může se použít i obyčejná lepicí páska, aby bylo patrné, jak bude výrobek nakonec vypadat. Podobného postupu lze využít i při barvení, pokud je tedy možnost mít model rozložený po barvách, nemusí se pak operátor v dalších fázích zabývat tím, že bude pracně olepovat ty části, které chce, aby zůstali jinak barevné. Pokud je úspěšně provedena tato kontrola, může se začít skutečně lepit. Doporučované lepidlo je lepidlo s aktivátorem, a to buď s fixem nebo ve spreji. Lze také použít vteřinové lepidlo. Během práce s lepením různých součástí lze narazit na více či méně namáhané díly. Pro dosažení vyšší pevnosti lze vyztužit namáhané díly armaturou, aby nedošlo ke snadnému lomu. Nejlepší je použít kovové profily, které po navrtání děr do plastu lze zasunout dovnitř modelu. Jako profil k vyztužení je možno použít šrouby, trubky či dráty, špejle nebo i plastové desky. [27]



Obrázek 19: Vyztužování výtisku laminátem. [27]

Při velkých a tenkých plochách lze použít k vyztužení laminát, který zajistí strukturální pevnost celého modelu, což je vyobrazeno na *obrázku 19*. Do laminátu se přidá indikátor dle doporučení výrobce. Laminát se promíchá v misce například štětcem. Směs se poté vetře do vnitřní části modelu za pomoci štětce. Pokud je i tak model křehký, je možné použít ještě skelnou tkaninu, která se vmáčkne do již vetřeného laminátu a přetře se další vrstvou. Jsou-li na modelu nějaké ostré rohy, jednoduše se použije smirkový papír, aby byl povrch hladký a nedošlo k poranění při manipulaci. Laminát je nutné natírat v dobře větrané místnosti nebo venku, převážně kvůli toxickým výparům. Ideální teploty jsou nad 20 °C. [27] [28]

Dalším postupem je opracování výtisku a příprava vyhlazení. Nejprve je třeba zbrousit výtisk, až poté je možno přejít k zahlazení mezer mezi jednotlivými díly. K tomu slouží karosářské kytý určené pro automobilový průmysl. Po zaschnutí se model opět zbrousí smirkem. Až když je model takto připraven, lze nanést vrstvu kytý na zbytek modelu, poté opět zbrousit povrch a takto stále dokola až do úplného vyhlazení. Mezi každým nanášením a broušením kytý je dobré model zastříkat fillerem ve spreji, ten zvýrazní kontury mezi jednotlivými vrstvami, lépe se pak rozpoznají nerovnosti. Barva se stříká z jednoho konce na druhý, dobré je se vyhnout zdržování se na jednom místě, aby barva nezačala stékat. [6] [27]

Po zbroušení se model zastříká základovou barvou a vyladí se výtisk jemným smirkem k dosažení hladkého povrchu a k nanášení poslední vrstvy základové barvy. Základová barva se opět zbrousí a dochází k aplikaci dalších barev, které se nanášejí od nejhůře dostupných míst nebo největších ploch. Nakonec se povrch zastříká bezbarvým sprejem k fixaci. Jakmile jsou barvy nanášeny, je možné použít další techniky. Chipping je technika, při které za pomoci kousku molitanu namočeného v barvě a následně osušeného, docílíme tzv. „obouchaného“ efektu. Molitan se namočí do barvy, následně vytře do ubrousku a hranou molitanu tupuje

na model. Washování znamená nanášení hodně zředěné barvy měkkým štětcem na model. Touto metodou lze vyrýsovat prohlubně či linky. A při technologii drybrushing se používá plochý štětec, na který se následně nanese barva, která se následně vytře do ubrousku. Touto technikou se zvýrazní veškeré hrany modelu i detaily, viz *obrázek 20*. Finální barvy modelu se opět zastříkají bezbarvým lakem, zabrání se tak poškození barev při další manipulaci. [27] [28]



Obrázek 20: Drybrushing. [28]

Jelikož jsou materiály ABS rozpustné v acetonu, lze toho využít klepení jednotlivých dílů k sobě. Stačí obě plochy lehce potřít acetonem a přiložit je k sobě. Aceton se dále používá k vyhlazování povrchu modelu, je možné ho na krátkou chvíli do acetonu ponořit, však jen na 5–10 s, nebo model uzavřít do nádoby s acetonem, který je pouze na dně. Acetonové páry pak budou pomalu model vyhlazovat. Vyhlazováním se však ztratí jemné detaily modelu a povrch se stane lesklým. Aceton je hořlavá kapalina, její výpary jsou spolu s kyslíkem tvůrcí výbušné směsi, proto se s ním pracuje jen v dobře větraných prostorech, v ochranných rukavicích a s brýlemi. Stringování neboli tenké vlásky na výtisku, lze do jisté míry odstranit horkovzdušnou pistolí, která však nesmí být dlouhodobě nahřívána, jinak dojde k deformaci. Materiály jako PLA a PETG se dobře lepí kyanoakrylátovým (vteřinovým) lepidlem. Pro zrychlení procesu vytvrzení se používá aktivátor. Materiál PLA je rozpustný chloroformem, není však vhodný k vyhlazování jako aceton pro ABS z důvodu, že hodně naleptává povrch modelu. Je vhodný spíše pro lepení PLA dílů, i když je snazší použít již zmiňované vteřinové lepidlo. [1] [6]

4.4.1 Automatizované úpravy výtisků

Pro dodatečné úpravy výtisků je velmi výhodné použití automatizovaných procesů, kdy tento proces přináší obrovské úspory oproti namáhavé ruční práci. Kombinace těchto postupů se vyplácí všude tam, kde se tiskne pravidelně, také ve velkých sériích a je nutné odstraňovat dočasné podpěry, upravovat drsnosti povrchu apod. Tato inteligentní technologie musí být spolehlivá a také dostatečně předvídatelná pro operátora. Tento způsob opracování důkladně zpracovává každý výtisk, a to bez ohledu na jeho složitost, spolehlivě dokáže odstranit dočasné podpěry, a dokonce je tu i možnost povrchových úprav. Takovéto technologie jsou určené též pro odstraňování pryskyřic a materiály se mohou i kombinovat, některé společnosti dokáží vytvořit takový stroj přímo na míru zákazníkovi dle jeho požadavků. Ať už se tisknou termoplasty (technologie FDM/FFF), pryskyřice (SLA/DLP) nebo třeba kovy (DMLS–SLM). [6] [29]

V nabídkách různých výrobců se nachází spousta strojů pro široké spektrum použití v postprocessingu, viz *obrázek 21*. Pro odstraňování dočasných podpěr a pryskyřic je možné použít ponořné nebo stříkové systémy. Ponořné systémy mají rotační pohyb při ponoření do čisticí kapaliny, který zajišťuje rovnoměrné míchání. Ultrazvuková tvorba bublin vytváří vysokofrekvenční vlny, které víří kapalinu a dobře tak přilnou k dočasným podpěrám nebo k přebytečné pryskyřici, které je nutné z výtisků odstranit. Stříkové systémy využívají objemových a proudových stříků čisticí kapaliny, které působí z protilehlých směrů, shora i zdola. Spolu s kolmým lineárním pohybem slouží pro podporu mechanického odstraňování dočasných podpěr či přebytečné pryskyřice. [29]



Obrázek 21: Ukázka strojů pro odstraňování dočasných podpěr a pryskyřic od společnosti PostProcess. [29]

Pro povrchové úpravy výtisků, kde se dosahuje velmi dobré drsnosti povrchu (R_a), slouží horizontální nebo vertikální cirkulační pohyb při ponoření do směsi kompozitního abraziva a kapaliny, zajišťující rovnoměrné působení mechanické síly na povrch výtisků. [29] [30]

Tyto technologie, jak již jejich robustnost napovídá, nejsou vhodné pro samostatné použití, hodí se spíše pro průmyslové využití, kdy je zaručena návratnost v podobně vytištěných, očištěných a vytvrzených dílů. Cenová dostupnost takovýchto strojů se pohybuje v řádech statisíců. Investicí do těchto multifunkčních strojů lze ale získat mnohé výhody, nejenom které se podepisují na kvalitě povrchu, i když je to stěžejní, ale také šetří samotnou práci operátorů. Ukázka preciznosti viz *obrázek 22*. V dnešní době je stále více probíraným tématem automatizace, ke které tyto stroje velmi příznivě přispívají a mohou se považovat za takový trend budoucnosti. [30]



Obrázek 22: Rozdíl po a před automatizovaným opracováním povrchu (podpěry, 5 min). [30]

5 Ideální rozložení pracoviště

Nadcházející kapitoly se již zabývají konkrétním rozložením prostor a také potřebnými pomůckami pro přípravu, průběh i následnou úpravu výtisků. Po popsání jednotlivých technologií a všech postupů celkové výroby produktů na 3D tiskárnách je zde prostor pro shrnutí nutných druhů nábytků, průmyslových regálů a pomůcek nutných pro pracoviště 3D tisku zaměřené na technologie FDM a SLA.

5.1 Pořadí operací a potřebné pomůcky

V předchozích kapitolách této práce je podrobně popsán postup a s tím i spojené pořadí jednotlivých operací, které na sebe navazují při 3D tisku. Tato kapitola ještě více rozšiřuje tuto problematiku, a to konkrétně o celkový pohled na vybavení místností. Pracoviště je zde rozděleno do tří celků, které odpovídají přípravě tisku, samotnému průběhu tisku a postprocessingu.

5.1.1 Příprava tisku – potřebné pomůcky, nábytek a vybavení

Příprava tisku je pro všechny 3D technologie stejná. Samotný postup je popsán o několik kapitol výše, v této kapitole je pouze shrnutí nejn nutnějších pomůcek, nábytku a také vybavení pro ideální pracoviště 3D tisku. Pro přípravu tisku je nutné vytvořit prostředí podobné kanceláři, ve které pracují například i ředitelé a účetní. Musí zde být velký pracovní stůl, na kterém je umístěn dostatečně výkonný notebook či monitor, samozřejmě s klávesnicí a počítačovou myší. Dále je vhodné na stůl umístit tiskárnu na papír pro případný tisk dokumentace. Nesmí se též zapomenout na kancelářské potřeby (tužky, propisky, nůžky, sponky na papír, ...), dále na různé organizéry a případné SD karty či USB flash disky pro přenos dat do tiskárny.

U stolu by měla být umístěna ergonomická kancelářská židle s opěrkami, které se dají přizpůsobit danému pracovníkovi. V těsné blízkosti je pak umístěn odpadkový koš. Pro správnou organizaci výroby, či poznámky všeho druhu je též dobrou vychytávkou připevnit na zeď bílou tabuli s barevnými fixami. Vzhledem k riziku poškození zdraví nebezpečnými výparů z tiskáren je též nedaleko umístěna výkonná čistička vzduchu, která alespoň povrchově zachytí některé nečistoty. Toto pracoviště je též opatřeno velkým stropním svítidlem, avšak je dobré přidat i tak stolní lampu přímo k počítači, aby si mohl pracovník případně více posvítit na práci. Pro zajištění většího pohodlí je také vhodné doplnit místnost o pohodlné židle či pohovku a také případně pověsit obraz na zeď či přidat květiny.

5.1.2 Průběh tisku – potřebné pomůcky, nábytek a materiály

Průběh tisku je již nutné rozdělit na to, jak to vypadá v případě FDM tisku a jak to vypadá u tisku technologií SLA. Vzhledem k tomu, že se jedná o rozdílné technologie, bude také rozdílný jejich souhrn pomůcek, nábytku a materiálů potřebných k tisku.

V případě technologie FDM je pracoviště opatřeno dvěma tiskárnami otevřenými a jednou tiskárnou zakrytovanou, tedy uzavřenou. Pro otevřené tiskárny je nutné opatřit vhodný stůl, požadavky na něj nejsou nijak náročné, stačí dřevěný nebo i plastový stůl s odpovídající nosností a výškou.

Dále je nutné zajistit ventilační systém na odsávání částic, které jsou vypouštěny do vzduchu v průběhu tisku. Prvním řešením může být čistička vzduchu, která však musí splňovat řadu kritérií, je vhodné hledat funkce jako využívání vysoce účinných vzduchových filtrů pevných částic, využívání dřevěného uhlí a také je třeba zvolit správnou velikost čističky vzduchu se specifikací pro danou místnost. Lepším způsobem však zůstává použití odsavače vzduchu, který zlepšuje větrání v uzavřené místnosti. Funguje tak, že nasává ohřátý vzduch a vyměňuje ho za studený zvenčí. Tento princip probíhá pomocí

ventilátorů a sacího potrubí. Na trhu existují dva hlavní druhy, a to dvojité reverzibilní odsavače vzduchu s termostaty a také reverzibilní odsavače vzduchu bez termostatů. Posledním řešením může být též stavba krytů, které vytvoří vzduchotěsný prostor, vybavený uhlíkovými filtry, ventilátorem a suchou hadicí vedoucí ven z místnosti. Ukázka na míru zkonstruovaného provedení odsávání viz *obrázek 23*. [31]



Obrázek 23: Možnost ventilace při FDM tisku. [31]

Další důležitou součástí vybavení pracoviště FDM tisku je regál na filament, tedy materiál ve formě strun namotaných na špulkách. Určitě zde nemůže chybět velká uzavíratelná skříň s policemi, kam se uschovávají důležité pomůcky pro tisk, například kufřík s běžným nářadím (šroubováky, kladivo, kleště, oboustranné klíče, ...), stěrky na podložku, kaptonové pásky, nůžky, tyčinkové lepidlo na podložku, aceton k odmaštění, různá rozpouštědla a naleptávadla, utěrky nebo jiné hadříky, měřidla (metr) apod. Jistě by zde měl být též zásobník na odpad. V tomto prostoru postačí mít stropní svítidlo. Je zde také důležité zmínit téma klimatizace prostor. Teplý vzduch je zejména v létě dosti nepříjemný a materiál není proti horku zvláště odolný. Základ tak tvoří silikagelové pytlíky v boxech s filamentem, případně je možné pracoviště doplnit o sušičku (troubu) na rychlé vysušení materiálu před tiskem, nebo ji použít v případě podezření na ovlivnění tisku vlhkostí.

SLA tisk obsahuje trochu jiné parametry. Na pracovišti se vyskytují dvě stolní tiskárny, je proto nutné zajistit vhodný stůl, na kterém mohou být umístěny a také jedna tiskárna produkční. K zajištění vhodné ventilace je zde použita ventilační digestoř přímo nad tiskárnami, jelikož se jedná o zakrytované tiskárny, není koncentrace uvolňovaných částic tak závažná. Pro uskladnění tekutých pryskyřic je v blízkosti regál. Uvnitř velké uzavíratelné skříň s policemi je též umístěn kufřík s běžným nářadím (šroubováky, kladivo, kleště, oboustranné klíče, ...), kaptonová

páska, nůžky, lepidlo, různá rozpouštědla a naleptávadla, utěrky nebo jiné hadříky, měřidla (metr) apod. Důležitým bezpečnostním prvkem jsou osobní ochranné pomůcky – ochranné brýle, nitrilové rukavice, respirátor a ochranný oděv. Pro nakládání s odpadem musí být také myšleno na nádoby určené k likvidaci pryskyřic. V tomto případě je též možné použít k osvětlení pouze stropní svítidlo.

5.1.3 Postprocessing – potřebné pomůcky, nábytek a materiály

Postprocessing u FDM tisku není ve všech případech tak potřebný jako u technologie SLA, přesto mají některé věci společné. Nutností je velký pracovní stůl, avšak pro FDM by mě být nejlépe dřevěný, aby nedocházelo k tavení plastu a u SLA by zase naopak měl být vyrobený ze skla, či potažený plastovou fólií, aby se zamezilo vsakování pryskyřice do dřeva. Dále by zde měla být nepojízdná pracovní židle a odkládací police nad stolem, kde jsou nejnужnější potřeby jako tužky, papírky na poznámky, nůžky, štětce a sklenice na tekutiny. Dále se hodí připevnit na pracovní desku stolní svěrák nebo jiné upínky pro zajištění výtisků. Při postprocessingových operacích je též vhodné použití osobních ochranných pomůcek, kterými mohou být rukavice, respirátor či ochranný štít nebo brýle. Součástí této části pracoviště by měl být odpadkový koš a také v případě FDM, zásobník na odpad a v případě SLA, nádoby na likvidaci pryskyřic. K dispozici by měl být také odkládací stolek na kolečkách a regál na hotové výrobky. Místnost by měla být osvětlena stropními svítidly a k tomu stolními lampami pro lepší viditelnost u pracovního stolu. K pracovnímu stolu je nutné umístit odsávání (např. digestoř) nebo vysavač pro odstranění prachu a chemikálií vzniklých při práci s brusku nebo při lakování. Je možné mít v blízkosti též umyvadlo či nějaký zdroj vody.

Ve velké uzavíratelné skříni s policemi se nachází různé pomůcky např. základové barvy, akrylové barvy, barvy ve spreji, plnič pro nástřik stříkací pistolí, stříkací pistole, ruční bruska, karosářský tmel, vteřinové lepidlo, brusný papír, kousek molitanu, štětce, bezbarvý lak, horkovzdušná pistole, aceton, dále také pro FDM: lepidlo s aktivátorem, kovové profily na vyztužení výtisků (šrouby, trubky, dráty), špejle jako výztuha, směs pro přípravu laminátu určená k natírání na výrobek. Speciálně pak pro SLA: izopropylalkohol (ke smytí přebytku pryskyřic). Pracoviště FDM tisku má navíc k dispozici automatizovaný stroj pro postprocessing a pracoviště SLA tisku zase lihovou čistící lázeň na očištění výtisků a též UV box, kde dochází k vytvrzení UV světlem.

5.2 Potřebný prostor

Potřebný prostor se liší v závislosti na použité technologii tisku, ale také v závislosti například na velikosti tiskárny, používaných nástrojích a pomůckách, či dokonce na velikosti dané místnosti, kde se tisk bude uskutečňovat. V tomto případě ale není žádné omezení z hlediska prostoru, proto se může libovolně

využívat. Každý stroj má však daný prostor, na který se musí vejít i s operátorem, přesné rozměry jsou však řešeny až v kapitole, kde je rozebrán návrh pracoviště, a vyplývá tak z velikostí používaného nábytku a také velikostí samotných používaných strojů.

6 Zdravotní uzpůsobení prostor

Aditivní technologie byly v posledních letech velmi rychle rozvíjeny. I přes tento dechberoucí pokrok je stále mnoho otevřených otázek a oblastí, kde jsou naplňovány současné limity této technologie. Za pomoci intenzivního výzkumu a vývoje se všemi těmito prostředky posouvají limity, zkoumají se nové cesty a testují se nové technologie. V následující části jsou tak zkoumána kritická omezení aditivní výroby. [15]

Tavení plastů nebo jiných materiálů, které jsou nezbytně nutné pro 3D tisk, vyžaduje obrovské množství elektrické energie. Často uváděným příkladem je plastová součást, která se tradičně vyrábí vstřikováním, podle týmu výzkumníků z univerzity v Loughborough je 3D tištěný díl stejného tvaru a objemu materiálu, avšak vytištěný na tiskárně, asi 50 až 100x méně hospodárný z hlediska spotřeby elektrické energie. Výzkumníci se tak soustřeďují na vyšší efektivitu procesů a celkové zlepšení v oblasti snižování spotřeby energií. Na druhou stranu je však patrné, že srovnávání těchto procesů není přesné, protože 3D tiskárny potřebují méně surovin a vytvářejí mnohem méně odpadu než vstřikování. Proto je potřeba další energie pro odstranění odpadu. Vstup pro výrobu jakékoliv součásti se skládá z mnoha prvků, jsou zde zastoupeny například náklady na dopravu nebo náklady na skladování, to znamená, že náklady tvoří pouze jednu část celkových nákladů. Počítají se tak nejen náklady na elektřinu, ale je třeba vzít v úvahu i další složky nákladů, hodnotit celkový výsledek a zisk. [15] [31]

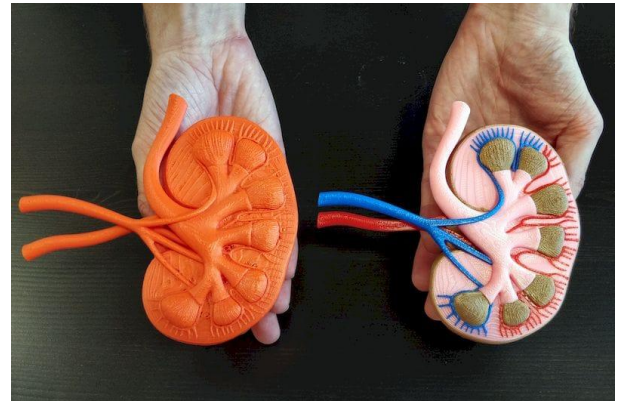
Pro tisk není vhodný jen tak nějaký materiál. Navzdory novým možnostem a rychlému rozvoji vícemateriálového tisku stále existuje mnoho materiálů, které tisknout nelze. V dnešní době se vyrábí mnoho zboží z kombinace různých materiálů, proto je multimateriálový tisk vnímán jako velká výzva. Nabízejí se první tiskárny, které umožňují tisk v různých barvách a heterogenních materiálech. Podobně jako u inkoustových tiskáren se ze tří základních barev smíchají stovky barevných stupňů. [15]

Kanadská společnost Mosaic Manufacturing, která se zabývá digitálními technologiemi vydala v roce 2019 novou vychytávku, se kterou mohou téměř všichni uživatelé FDM tiskáren vylepšit svá zařízení. Jedná se o přídatné zařízení, které kombinuje čtyři filamenty a v reálném čase je podává do tiskárny. Nejsou již nutné žádné úpravy, zařízení Palette 2 (obrázek 24) umožňuje tisk z více druhů

materiálů, či z materiálů více barev, na 3D tiskárně s jednou extruzí (obrázek 25). Pomocí těchto přídatných zařízení (Palette 2 a Palette 2 Pro) lze vytvářet různorodé modely. Například je možné tisknout velké přesahy pomocí vodorozpustných podpor, vytvářet tepelně a voděodolné materiály ze čtyř barev z odolného PETG nebo též tvořit funkční výrobky pro konečné použití za použití kombinací PLA s pružným TPU. Palette 2 zvládá brát až čtyři vlákna a spojit je do jednoho. Toto vlákno se poté přivádí do tiskárny a umožňuje tak tisknout výtisk z více vláken i na tiskárně s jedním extrudérem. [32]



Obrázek 24: Řez zařízením Palette Mosaic 2. [32]



Obrázek 25: Použití zařízení Palette Mosaic 2. [32]

Při 3D tisku lze také vytvářet různé statické tvary. Tisk pohyblivých částí je však problematický. Při tisku složitých pohyblivých částí se tisk pravděpodobně nevyhne sestavování. Kromě toho je třeba, aby pohyblivé části byly vytištěny s určitými rozměry a kvalitou povrchu, které by nebylo možné během tisku dosáhnout, je tedy vždy potřeba určitá vůle. Tato vzdálenost mezi dvěma pohyblivými částmi je nutná, aby se pohyblivé části nespojily dohromady. [15]

Zmínku si zaslouží v této práci i technologie biotisku, která se velmi rychle rozvíjí. V dnešní době se již tisk využívá pro vytváření pásů živé tkáně, avšak od rutinního tisku složitých lidských orgánů je lidstvo obecně možná ještě roky nebo dokonce desetiletí daleko. Nové produkty, jako jsou orgány budou velmi složité, mohly by se tak stát samostatnou komoditou na prodej. S implementací nové technologie bude také jistě spojeno mnoho nepředvídatelných rizik, bude zapotřebí regulace výroby a přísná kontrola kvality. [15] [33]

Nejčastěji používané filamenty ABS a PLA jsou na bázi ropných plastů nebo bioplastů. Tyto materiály jsou obecně považovány za bezpečné pro domácí použití, avšak má to i svá negativa. Zahříváním plastů ve 3D tiskárně se uvolňují výpary s nanočásticemi a těžkými kovy, které mohou být toxické a vzniká tak riziko podobné jako při kouření cigaret. Říká se, že není rozumné nechat běžet tiskárnu v ložnici, kde spí malé dítě. Pokud uživatel používá tiskárnu na plast doma nebo v kanceláři, měl by otevřít okno nebo použít ventilátor, aby vzduch zůstal čerstvý

a čistý. Myšlenka tvořit si předměty doma podle vlastní fantazie je lákavá, i když funkčnost a spolehlivost může být bez hlubší znalosti konstrukce a vlastností materiálů problematická. [15] [33]

Vdechování částic kovového prášku je více nebezpečné. Například vdechování prášku z nerezové oceli může způsobit zimnici, horečku, pocení, nevolnost a kašel. Kovový prášek je vysoce výbušný, zejména velmi jemné prášky jako jsou prvky hořčíku nebo hliníku. Velikost částic je důležitá a obecně platí, že čím menší velikost částic, tím větší pravděpodobnost výbuchu. Je u nich také pravděpodobnější, že se dostanou do vzduchu. [15]

6.1 Emise částic z komerčně dostupných stolních tiskáren

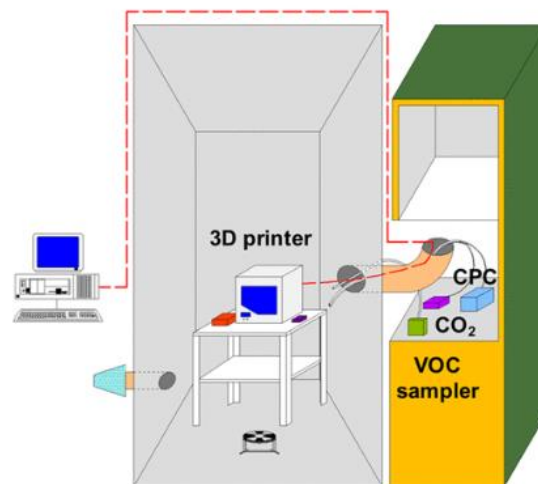
Předchozí výzkumy ukázaly, že stolní 3D tiskárny mohou během tisku emitovat velké množství ultrajemných částic (UFPs – ultrafine particles, částice menší než 100 nm) a některých nebezpečných těkavých organických sloučenin (VOCs – volatile organic compounds). Ačkoliv dosud bylo testováno velmi málo kombinací vláken a 3D tiskáren, je patrné, že materiály, které byly považovány za zdravotně nezávadné, tak nezávadné nejsou. V této studii jsou kvantifikovány emise UFPs a VOCs z pěti komerčně dostupných stolních 3D tiskáren pro vytlačování filamentů využívajících až devět různých filamentů pomocí řízených experimentů v testovací komoře. Výsledky screeningové analýzy potenciální expozice těmto produktům v typickém prostředí malé kanceláře naznačují, že je potřeba postupovat opatrně při provozu tiskáren a vláken ve špatně větraných prostorách nebo bez pomoci kombinovaných systémů filtrace plynu a částic. [34]

Nyní je již dobře známo, že při tepelném zpracování mnoha termoplastických materiálů jsou emitovány jak plyny, tak částice. O typech a velikostech emisí ze stolních FFF 3D tiskáren a o tom, jak se liší podle materiálu vlákna nebo vlastností tiskárny, je však známo jen velmi málo. V roce 2013 byla publikována první známá měření emisí ultrajemných částic, vyplývajících z provozu jedné značky a modelu komerčně dostupné FFF tiskárny, využívající jak ABS, tak PLA filamenty. Tato zjištění byla zásadní, protože bylo prokázáno, že emise z tepelného rozkladu termoplastů mají toxické účinky na zvířata a expozice UFPs z jiných zdrojů je spojena s řadou dalších nepříznivých účinků na lidské zdraví. Dále byla prováděna pouze jedna další publikovaná studie, která zkoumala emise ze stolních 3D tiskáren založených na vytlačování materiálu. Kim a kol. měřili emise částic, celkových těkavých organických sloučenin, několika eldehydů, ftalátů, benzenu, toluenu, ethylbenzenu a m-, p- xylenu (BTEX) ze dvou různých FFF tiskáren pracujících v malé komoře s využitím ABS i PLA filamentů. Bylo potvrzeno, že emise částic byly vyšší u tiskáren využívající ABS filamenty ve srovnání s PLA filamenty. Navzdory těmto studiím stále přetrvávají výrazné mezery ve znalostech

emisí z 3D tiskáren. Dosud byl testován jen velmi omezený počet značek a modelů tiskáren, a ještě méně materiálů. [34] [35]

Stále zde nejsou téměř žádné informace o tom, jak může design, tvar tištěných materiálů nebo vlastnosti tiskárny (například přítomnost krytů), ovlivnit emise plynů nebo částic. Tato studie všechny tyto poznatky dále rozvíjí. Posouvá kvantifikaci rychlostí emisí částic a široké škály specifických VOCs z pěti oblíbených komerčně dostupných FFF tiskáren využívajících až devět různých vláken k tisku standardizovaných testovacích objektů ve středně velké testovací komoře. Výsledky jsou využity ke zkoumání rozdílů emisních částic a VOCs na základě materiálu vlákna a vlastností tiskárny. Jsou zde také poskytnuty předběžné údaje o vlivu geometrie tiskového objektu a použití částečného ohrazení. [34]

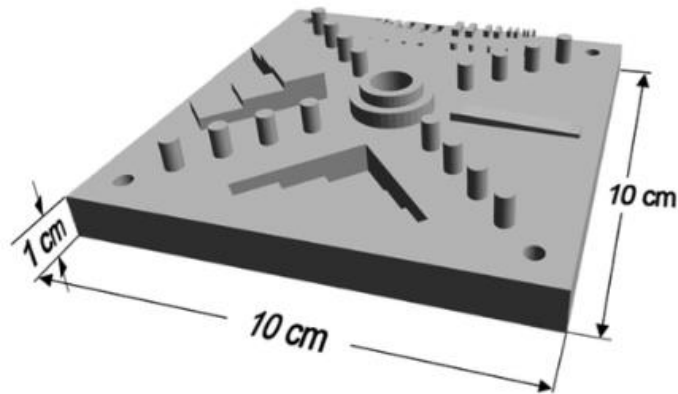
Všechna měření testování emisí byla prováděna v komoře z nerezové oceli o objemu 3,6 m³ s malým směšovacím ventilátorem, též z nerezové oceli (obrázek 26). Každá tiskárna byla připojena ke stolnímu počítači umístěnému mimo komoru. Před začátkem každého experimentu byl do komory přiváděn filtrovaný vzduch konstantní rychlostí ventilace, přibližně 1 h⁻¹ po dobu alespoň 8 hodin, aby se dosáhlo počátečních podmínek ustáleného stavu. Podložka 3D tiskárny byla upravena pro tisk před utěsnněním komory otřením izopropylalkoholem, nebo v jiných případech, v závislosti na tiskárně a kombinaci vlákna, nanesením malého množství lepidla z lepících tyčinek podle doporučení výrobce. Poté byla tiskárna zapnuta a začala tisknout malý předmět. [34]



Obrázek 26: Testovací komora. [34]

Pro všechny testy, kromě jednoho, se tiskl standardizovaný vzorek o rozměrech 10x10x1 cm z Národního institutu pro standardy a technologie (NIST – National Institute of Standards and Technology), viz obrázek 27. Vzorek byl vybrán, protože byl vyvinut jako standard pro hodnocení výkonu aditivních výrobních technologií a má řadu funkcí, o kterých se předpokládalo, že potenciálně ovlivňují dynamické

emise tiskárny, včetně kombinace plných objemů, tenkých výstupků, otvorů a prohlubní. Též se opakoval jeden test s jedinou tiskárnou a kombinací vlákna, kdy se tiskla krychle o velikosti 195 cm^3 s přibližně stejnou dobou tisku jako vzorek NIST, což umožnilo vyhodnotit vliv tvaru tiskového objektu na emise. Zahřívací periody trvaly mezi 5 a 10 minutami v závislosti na tiskárně a filamentu, doba tisku se pohybovala od 2,5 do 4 hodin, též v závislosti na kombinaci tiskárny, filamentu a tvaru předmětu. [34]



Obrázek 27: Testovaný vzorek. [34]

Koncentrace částic byly kontinuálně měřeny uvnitř výfukového otvoru komory pomocí CPC modelu 3 007 kondenzačního počítadla částic (CPC – Condensation Particle Counter) logovaných v 1minutových intervalech. CPC měří celkový počet koncentrací částic, a to mezi 10 nm a $1 \mu\text{m}$ s udávanou maximální koncentrací 105 cm^{-3} a průtokem vzorku 0,7 l/min. Koncentrace částic byly měřeny během všech fází experimentu, počínaje posledními 45–60minutovými měřeními na pozadí, zahrnující 2,5–4hodinový interval tisku a konečnou dobu rozpadu, přibližně 3 hodiny, během které se koncentrace částic nechaly klesnout směrem ke koncentraci pozadí s vypnutou tiskárnou. Pro toto testování bylo využito těchto pět modelů tiskáren: FlashForge Creator, Dremel 3D Ideal Builder, XYZprinting da Vinci 1.0, LutzBot Mini a MakerBot Replicator 2X. K těmto modelům byly též zkoušeny různé kombinace materiálů, kterých bylo celkem 16. Od různých barevných odstínů ABS a PLA, přes HIPS až po nylon, polykarbonát nebo kompozitní materiály s vláknitou příměsí. [20] [34]

Z výsledků experimentu vychází rychlé zvýšení koncentrace UFP ihned po zahájení tisku a přetrvávání po dobu prvních 10–20 minut, poté se snížily na nižší úroveň, i když to rozhodně nebyla obvyklá úroveň, ale stále vyšší. Během některých testů s jinými kombinacemi tiskáren a filamentů koncentrace UFP vyvrcholily na konci tiskové periody, kdy byly tvořeny tenké výstupky na tištěném objektu. Velikost a tvar dynamických koncentrací UFP se však značně lišil v závislosti na tiskárně, filamentu, tvaru tištěného předmětu, teplotě trysky a podložky. Tisk kostky místo testovacího modelu NIST s vláknem ABS významně nezměnil velikost emisních rychlostí UFP, i když mírně změnil časově proměnný

tvar profilu emisí UFP. Je zajímavé, že přítomnost krytu pouze mírně snížila míru emisí UFP. Větší redukce nebyly pozorovány možná proto, že kryt nebyl zcela utěsněn a byly vidět velké mezery. I když tato dvě srovnání poskytují předběžná data o tom, jak může tištěný tvar a přítomnost krytu ovlivnit emise částic z 3D tiskáren, nelze s ohledem na tento omezený soubor dat vyvodit žádné další definitivní závěry. [34]

Nejvyšší hodnoty emisí UFP se typicky vyskytovaly u tiskáren využívající ABS filamenty, se středními hodnotami rychlostí od $\sim 2 \times 10^{10}$ do $\sim 9 \times 10^{10} \text{ min}^{-1}$ u tiskáren ABS s krytem nebo bez něj. Nejnižší hodnoty emisí UFP se vyskytly u tří tiskáren používajících vlákna PLA, bez ohledu na značku a model tiskárny, se středními hodnotami emisí UFP $\sim 108 \text{ min}^{-1}$. [34]

Materiál vlákna způsobil většinu rozdílů v typech emitovaných VOCs, zatímco značka a model tiskárny způsobil většinu rozdílů v celkové hmotnosti VOCs emitovaných stejným vláknem. Odhady celkových rychlostí emisí VOCs se pohybovaly od přibližně $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro polykarbonátové vlákno až po téměř $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro nylonové vlákno. Teploty trysek neměly velký vliv na emise UFP z této sady tiskáren při nízkých ani vysokých teplotách podložky. Zdá se však, že teploty trysek ovlivňují rychlost emisí UFP při středních teplotách podložky, protože rychlosti emisí UFP byly vyšší se zvýšenými teplotami trysky. Ještě důležitější je, že samotná teplota podložky ovlivňuje rychlost emisí v tomto vzorku tiskáren. Většina kombinací tiskárna/vlákno s nejvyšší teplotou podložky měla nejvyšší emise UFP, zatímco většina kombinací s nejnižší teplotou podložky měla nejnižší emise UFP. Je však na místě poznamenat, že při omezené velikosti vzorku jsou tyto vztahy považovány pouze za sugestivní. [12] [34]

Zde uvedená měření emisí UFP a jednotlivých VOC mají důležité důsledky pro člověka a účinky na zdraví. Například styren, který je Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC – International Agency for Research on Cancer) klasifikován jako možný lidský karcinogen, byl ve velkém množství emitován všemi vlákny ABS. Kaprolaktam byl také emitován ve velkých množstvích čtyřmi vlákny: nylonem, vrstvenou cihlou a dřevem. Ačkoliv je kaprolaktam klasifikován jako pravděpodobně nekarcinogenní pro člověka, Kalifornský úřad pro hodnocení enviromentálních zdravotních rizik (OEHHA – California Office of Environmental Health Hazard Assessment) udržuje stále tuto látku jako akutní, při 8hodinové a chronické referenční úrovni expozice. Nejsou však známy žádné relevantní informace týkající se inhalační toxicity laktidu, primární individuální VOC emitované z vláken PLA. [34]

Pokud se předpokládá, že jedna stolní 3D tiskárna nepřetržitě pracuje v dobře promíchaném, zařízeném a klimatizovaném kancelářském prostoru, expozice kaprolaktamu z průběhu 3D tisku s nylonem a s vlákny na bázi nylonu, by mohla vést k nepříznivým zdravotním následkům, zejména u citlivých jedinců. Podle

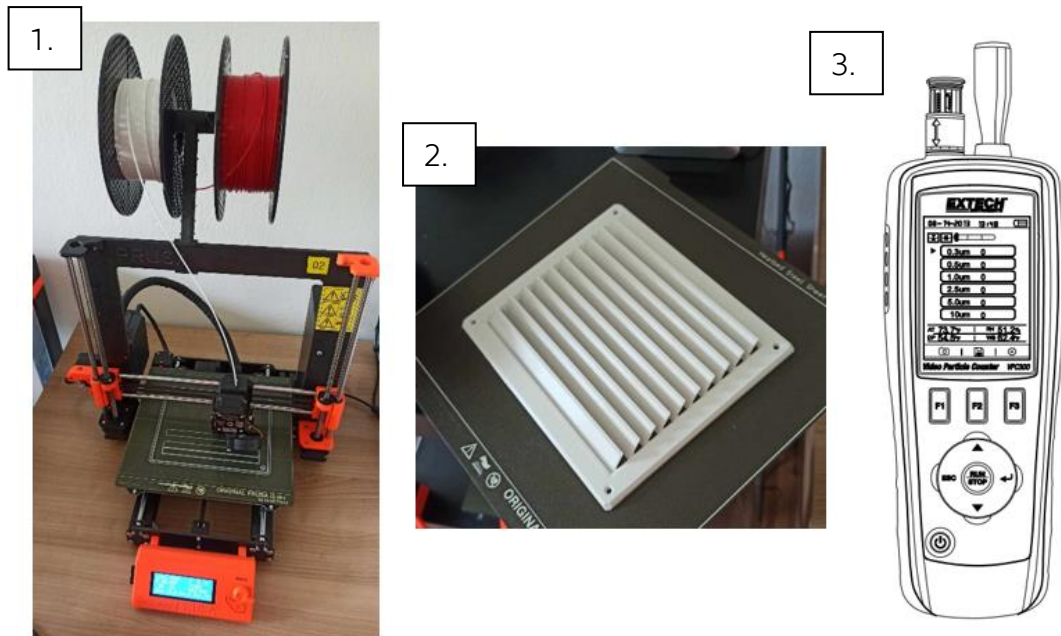
Centra pro kontrolu a prevenci (CDC – Centers for Disease Control and Prevention) je akutní expozice vysokým koncentracím kaprolaktamu dráždivá pro oči a dýchací cesty a může mít účinky na centrální nervový systém. Předpokládaná koncentrace styrenu v této konfiguraci by byla přibližně 20x vyšší, než je nejvyšší koncentrace styrenu naměřená v komerčních budovách ve studii U. S. EPA a více než 20x vyšší než průměrná koncentrace v rezidencích v USA. Existují také zprávy, že expozice styrenu v těchto koncentracích by mohla být pro lidské zdraví problematická. Některé předchozí studie uvádějí, že vysoké koncentrace styrenu v interiéru vedou k relativně vysokým celoživotním rizikům rakoviny, a dokonce i střední koncentrace byly spojeny se zvýšeným rizikem plicních infekcí u kojenců. [6] [34]

Z této studie vyplývá celá řada následujících doporučení. Výrobci by měli pracovat na navrhování materiálů s nízkými emisemi vláken anebo tiskových technologií. Při absenci nových nízkoemisních vláken by dále výrobci měli zapracovat na účinnosti utěsněných krytů na emise UFP i VOC, nebo by měli zavádět kombinované systémy filtrace plynů a částic. Do té doby je i nadále doporučována opatrnost při provozu mnoha kombinací tiskáren a vláken v uzavřených nebo špatně větraných prostorách bez pomoci systémů filtrace plynu a částic. To platí zejména pro vlákna na bázi styrenu i nylonu, na základě údajů z relativně velkého vzorku tiskáren a kombinací vláken hodnocených v této studii. [34]

6.2 Experiment měření částic v průběhu FDM tisku

Pro zjištění skutečného množství emitovaných částic do vzduchu v průběhu tisku na FDM tiskárně byl proveden jednoduchý experiment na akademické půdě ČVUT v Praze. Experiment byl proveden na dvou tiskárnách, a to konkrétně na modelech Original Prusa i3, MK3 S+ jednak s tryskou o průměru 0,4 mm a také s tryskou o průměru 0,6 mm. Měření bylo prováděno na počítačle částic VPC 300 od společnosti Extech Instruments, které je schopno zaznamenat velikosti částic od hodnoty 0,3 μm do hodnoty 10 μm , lze naměřit i částice větší, ale pro tento experiment jsou větší částice nepodstatné. Tisknutým materiálem byl PETG, který se tiskl souběžně na obou tiskárnách. Měření bylo prováděno vždy u každé tiskárny zvlášť a poté také obecně v dané místnosti, kterou byla laboratoř 3D tisku na plast (T4:B1-119) v budově ČVUT na fakultě strojní. Při každém měření se tedy vždy vycházelo ze dvou zprůměrovaných hodnot měřených na třech různých místech v místnosti.

Použitá tiskárna (Original Prusa i3, MK3 S+), výtisk (mřížka) a přístroj na měření (počítadlo částic VPC 300) je zobrazen na *obrázku 28*.



Obrázek 28: 1. Tiskárna Original Prusa i3, MK3 S+; 2. tištěný model (mřížka); 3. počítadlo částic VPC 300. [36]

Přístroj na počítání částic VPC 300 od společnosti Extech Instruments je schopný vyhodnotit čistotu prostředí dle normy ISO 14644-1:1999, která je dnes již poupravena a nahrazena normou ISO 14644-1:2015. V těchto normách je čistota vzduchu rozdělena do devíti kategorií podle koncentrace částic. Přímou v příloženém návodu k obsluze daného přístroje se nachází tabulka, která rozděluje počty částic do tří kategorií (obrázek 29), tyto kategorie však slouží pouze k referenčnímu rozdělení. První kategorie je zelená, vypovídající o hodnotách, které jsou v normě. Druhou kategorii tvoří žlutá barva, zdůrazňující obezřetnost nad těmito hodnotami, tedy ve své podstatě pozor. A poslední skupinou je označení červené barvy upozorňující na nebezpečí. [36]

Channel	Green	Yellow	Red
0.3um	0 to 100,000	100,001 to 250,000	250,001 to 500,000
0.5um	0 to 35,200	35,201 to 87,500	87,501 to 175,000
1.0um	0 to 8,320	8,321 to 20,800	20,801 to 41,600
2.5um	0 to 545	546 to 1,362	1,363 to 2,724
5.0um	0 to 193	194 to 483	484 to 966
10.0um	0 to 68	69 to 170	171 to 340

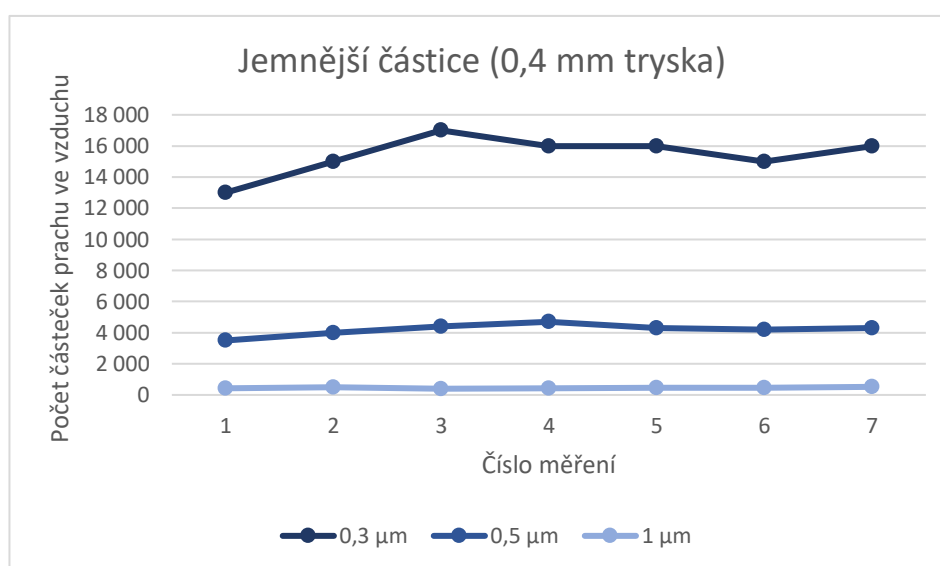
Obrázek 29: Rozdělení počtu částic do jednotlivých kategorií. [36]

Na každé tiskárně byl tištěn jiný model, avšak s podobnými vlastnostmi, jednalo se o menší a větší mřížku o různé hustotě vrstev. Výtisk na tiskárně s 0,4 mm tryskou trval 4 hodiny a 44 minut, oproti tomu tisk na tiskárně s 0,6 mm tryskou trval pouze 2 hodiny 54 minut. Měření probíhalo tak, že se nejprve změřily hodnoty částic prachu v místnosti a u jednotlivých tiskáren před tiskem, poté přibližně 5 minut po zahájení tisku, pak též každou hodinu, a nakonec po dokončení tisku.

Následující tabulky a grafy znázorňují naměřené a již zprůměrované hodnoty počtu částic ve vzduchu na jednotlivých místech.

Tabulka 1: Naměřené a zprůměrované počty částic (0,4 mm tryska).

0,4 mm tryska	Před tiskem	Zahájení tisku (5 min)	1 h po zahájení tisku (30 %)	2 h po zahájení tisku (51 %)	3 h po zahájení tisku (70 %)	4 h po zahájení tisku (92 %)	Po tisku (4 h 44 min)
0,3 μm	13 000	15 000	17 000	16 000	16 000	15 000	16 000
0,5 μm	3 500	4 000	4 400	4 700	4 300	4 200	4 300
1 μm	430	510	400	430	470	460	520
5 μm	8	17	10	16	12	11	16
10 μm	4	8	4	6	4	5	5



Obrázek 30: Graf závislosti počtu částic ve vzduchu (0,4 mm tryska).

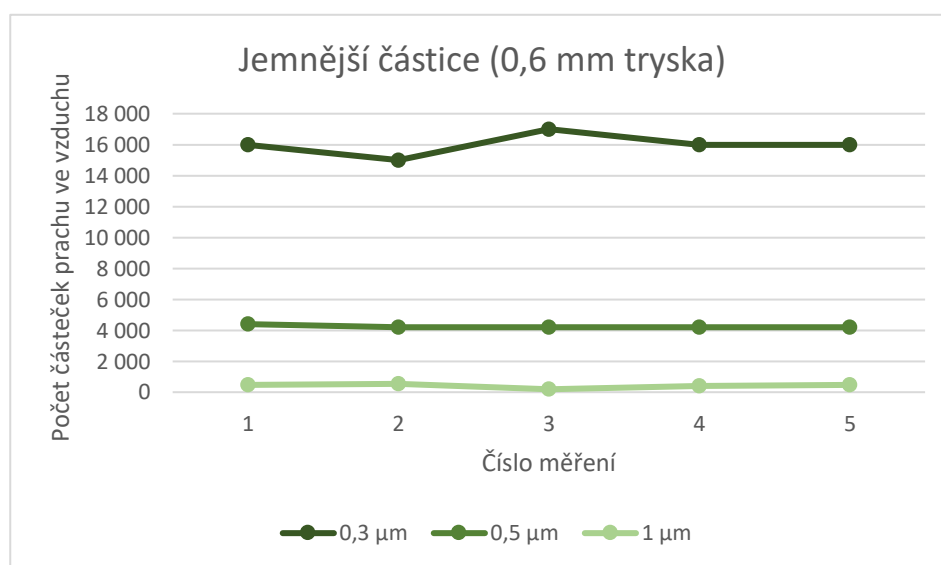
Z tabulky 1 a následného grafu (obrázek 30) je patrné, že počet jemnějších částic (0,3–1 μm) po zahájení tisku, na tiskárně s 0,4 mm tryskou, vzrostl a v celém průběhu tisknutí součásti nijak zvláště nekmital, je tedy možné říci, že předpoklady o tomto průběhu byly naplněny. Co se týká větších částic, tam bohužel výsledek tak jasný není, hodnoty se celkem hodně rozcházel, což mohlo být způsobeno zvýšenou prašností v místnosti nebo též umístěním tiskárny, tato tiskárna totiž byla umístěna přibližně 70 cm nad zemí, avšak byla na rozdíl od následující tiskárny dál od dveří. Na druhou stranu, je opravdu možný velký rozptyl větších částic ve vzduchu, takový počet je totiž zcela normální a záleží jen na momentálním víření prachu, které může být způsobeno pouhým otevřením dveří, tento jev je možný u všech prováděných měření.

Měření u druhé tiskárny, tedy s 0,6 mm tryskou, nesplnilo tak dobře očekávání, protože tiskárna byla umístěna přímo u dveří do místnosti, každý pohyb byl tedy znatelný, a to i jen když někdo prošel kolem místnosti na chodbě, dveře totiž

nejsou tak dobře utěsněné. I přes to je z *tabulky 2* a následného grafu jemnějších částic (*obrázek 31*) znatelné, že koncentrace částic je poměrně vysoká a k mírnému zhoršení v průběhu tisku došlo.

Tabulka 2: Naměřené a zprůměrované počty částic (0,6 mm tryska).

0,6 mm tryska	Před tiskem	Zahájení tisku (5 min)	1 h po zahájení tisku (47 %)	2 h po zahájení tisku (85 %)	Po tisku (2 hod 54 min)
0,3 μm	16 000	15 000	17 000	16 000	16 000
0,5 μm	4 400	4 200	4 200	4 200	4 200
1 μm	470	540	190	390	490
5 μm	27	18	11	12	16
10 μm	12	7	3	4	4



Obrázek 31: Graf závislosti počtu částíček ve vzduchu (0,6 mm tryska).

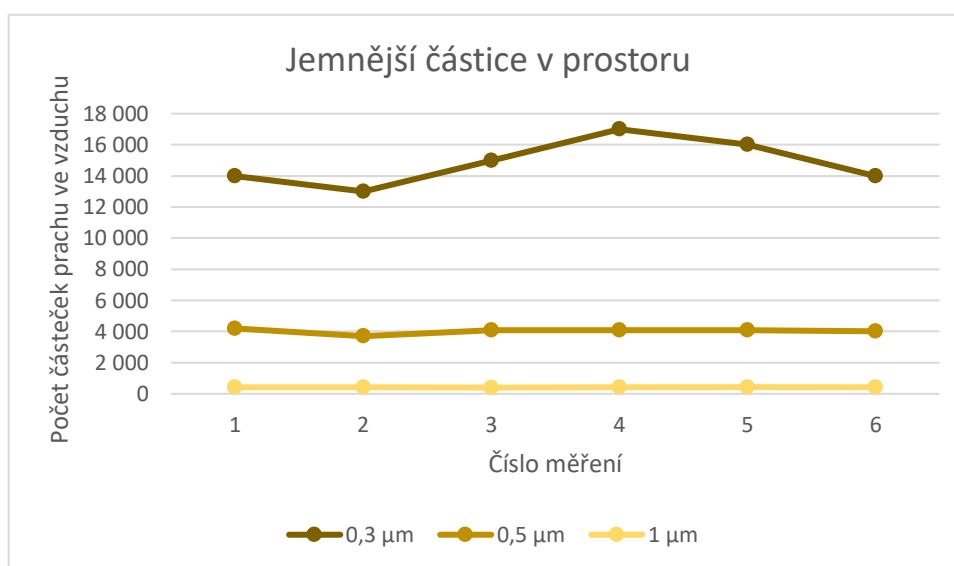
Poslední měření, tedy hodnoty prachových částic v celé místnosti, je možné srovnat s naměřenými hodnotami na chodbě (před učebnou) a také s hodnotami naměřenými venku (před školou). Po tomto zhodnocení je možné říci, že experiment má svoji vypovídající hodnotu.

Po nahlédnutí do *tabulky 3* s naměřenými hodnotami v celé místnosti a též do vytvořeného grafu (*obrázek 32*) se dá konstatovat, že hodnoty prachových částíček ve vzduchu před a po tisku jsou téměř shodné. Po zahájení tisku koncentrace jemnějších částic lehce poklesla a poté už nadále vzrůstala. Jak již bylo řečeno, naneštěstí zde bylo v průběhu měření několik parametrů, které mohly mít negativní vliv na konečné výsledky. Patří sem neustálá potřeba otvírat a zavírat dveře, poté také samotné umístění tiskárny (při zemi, ve vyšší výšce, u dveří, dále od dveří), prach v místnosti (čistota), rozptýlení částic v místnosti

(v různých částech místnosti jiná koncentrace) a v neposlední řadě také aktuální hustota tištěné vrstvy výrobku (hustší, řidší).

Tabulka 3: Naměřené a zprůměrované počty částic (celý prostor učebny).

Prostor učebny	Před tiskem	Zahájení tisku	1 h po zahájení tisku	2 h po zahájení tisku	3 h po zahájení tisku	4 h po zahájení tisku	Po tisku
0,3 μm	14 000	13 000	15 000	17 000	16 000	14 000	14 000
0,5 μm	4 200	3 700	4 100	4 100	4 100	4 000	3 400
1 μm	410	420	400	410	430	410	420
5 μm	11	13	9	11	14	19	16
10 μm	6	4	3	5	6	9	5



Obrázek 32: Graf závislosti počtu částic ve vzduchu (celý prostor učebny).

I přes tyto problémové situace a kritéria, je možné po porovnání s tabulkou hodnot na chodbě a venku před fakultou (tabulka 4) konstatovat následující. Jak již bylo v předchozích studiích zkoumáno, venku a v uzavřených prostorech je vždy vyšší koncentrace větších částic (5 a 10 μm) než těch úplně nejmenších, jedná se totiž o směs nejenom prachových částic. To se při tomto experimentu potvrdilo, naopak v místnosti, kde probíhal tisk na 3D tiskárnách, bylo obsaženo větší množství jemnějších částic (0,3–1 μm), které mohou způsobovat negativní účinky na lidský organismus, jak již bylo zmiňováno v předchozí kapitole. Po zhodnocení všech naměřených částic přístroj sám vyhodnotil, dle svých kritérií (obrázek 29), že všechny hodnoty se nachází v normě a jsou hodnoceny jako zelené, tedy bezpečné. Pro zajištění více přesných výsledků by bylo nutné zajistit lepší utěsnění místnosti a anulovat otevírání dveří, aby se prach v místnosti tolik nevířil a nezpůsobil takové velké rozptyly hodnot. Také by bylo nutné měření provádět častěji, např. každých 15 minut, pro tento experiment však bylo častější měření až téměř zbytečné, jednalo se spíše o přibližný experiment, na kterém bylo

cílem ověřit již provedenou studii, která se zaměřovala na emise částic z komerčně dostupných tiskáren, viz o kapitole výše v této práci.

Tabulka 4: Naměřené a zprůměrované počty částic (chodba a venku před fakultou).

	Chodba	Venku
0,3 μm	12 000	13 000
0,5 μm	4 000	3 300
1 μm	470	360
5 μm	20	23
10 μm	7	7

Pro ověření byl tento experiment zopakován následující týden. O týden později zde však byla řada nových negativních aspektů, které experiment ovlivnily. Jednalo se o velmi teplý den (venkovní teplota okolo 30 °C), proto bylo nutné větrat a nechat proudit vzduch, který vytvářel mírný průvan. Také nebyly hodnoty prachových částic měřeny od začátku tisku, ale až po nějaké době. A v neposlední řadě, jedna z tiskáren tiskla z materiálu PLA, nakonec se to ale projevilo jako nepodstatné. Tohle všechno mohlo měření ovlivnit, avšak v konečném důsledku je možné konstatovat, že se experiment choval podobně jako při prvním pokusu, hodnoty byly jen mírně zvýšené. Došlo tedy k jeho ověření a experiment měření částic v průběhu FDM tisku byl do jisté míry úspěšný.

6.3 Zdravotně nezávadné modely

Pro použití výrobků v potravinářství jsou velmi přísné hygienické podmínky. V Evropě platí regulace č. 10/2011, která určuje, jaké materiály jsou či nejsou vhodné ke kontaktu s potravinami. Na trhu se vyskytuje velké množství materiálů klasifikovaných jako nezávadné, existuje však pouze málo výrobců, kteří si obstarávají náročnou a drahou certifikaci pro své produkty. Obecně pak nutno říci, že certifikované materiály jsou podstatně dražší než ty ostatní. Obecně platí, že pro styk s potravinami je možné použít například materiály PLA či PETG. Naopak nevhodnými v těchto účelům jsou pak materiály na základě ABS, z kterých se uvolňují toxické částice. Bohužel takto jednoduchá tato problematika není. Při výběru filamentu je potřeba zohlednit použité barvivo. I do potenciálně zdravotně nezávadných filamentů se někdy přidávají toxické či migrující pigmenty, které mohou být při styku s potravinami nebezpečné. [37]

Pokud je správně zvolen filament, je důležité správně připravit tiskárnu. Tiskárna musí být co nejvíce čistá, a to zevnitř i zvenku, aby se do modelu nedostaly žádné nečistoty. Nejlepším řešením je též používat nerezovou trysku místo mosazné, která obsahuje olovo. Podle některých zdrojů se nedoporučuje tisknout extrudery, které obsahují PTFE trubičky, kvůli toxicitě tohoto materiálu při vysokých teplotách. Tímto však proces nekončí. Samotný výtisk nikdy nebude vhodný ke

styku s potravinami, protože obsahuje nerovnosti, ve kterých se mohou usazovat a množit bakterie a houby způsobující nebezpečné choroby. Je proto nutné výtisk nějak povrchově upravit. Nejlepší povrchovou úpravou je taková úprava, která zajistí kompaktní, hladký a snadno omyvatelný povrch. Toho se dá zajistit zalitím výtisku do průhledné, zdravotně nezávadné pryskyřice. Není však vhodné používat pro styk s potravinami pryskyřice, které nejsou opatřeny platným certifikátem o zdravotní nezávadnosti, důvody jsou popsány v kapitole výše. [37]

Je nutné brát ohled na toxicitu nevytvrzených resinů, pokud nejsou dostatečně vytvrzené, mohou uvolňovat nebezpečné látky. Tekuté resiny jsou totiž toxické a je třeba s nimi manipulovat v ochranných pomůckách. Po dodržení těchto základních pravidel lze vytvořit modely vhodné ke styku s potravinami, ale resinem ošetřené nádobí nebude mít nikdy takovou odolnost jako standardní nádobí. Nedoporučuje se použití na kuchyňská prkénka a ani nedokáže odolat vysokým teplotám, takže nesmí přijít do myčky či do mikrovlnné trouby. Při porovnání technologií vhodných pro 3D tisk zdravotně nezávadných modelů jednoznačně vítězí FDM nad SLA, technologie SLA je totiž mnohem více toxická, jak je již zmiňováno v předchozí kapitole. Ukázka zdravotně nezávadných modelů je vyobrazena na *obrázku 33*. [37] [38]



Obrázek 33: Ukázka zdravotně nezávadných modelů. [37]

6.4 Tisk z pryskyřice

Je důležité přiznat, že UV pryskyřice je toxická látka, která vyžaduje přísná bezpečnostní opatření. Ve své nevytvrzené kapalně formě obsahuje dráždivé látky, které mohou být pro člověka škodlivé a také znečišťující látky, které mohou být škodlivé pro životní prostředí a jiné živé formy. Některé z potenciálních škodlivých účinků pryskyřice však nejsou potvrzeny kvůli nedostatku výzkumu. Dlouhodobá rizika mohou zahrnovat menstruační problémy, změněné sexuální chování nebo plodnost, či dokonce poškození nenarozených dětí během

těhotenství. Chemické vlastnosti kapalných fotopolymerů je činí jedovatými při požití a také potenciálně dráždivými pro kůži. Kromě toho je nevytvrzená pryskyřice klasifikována jako nebezpečná pro vodní organismy. [38]

Nevytvrzená tekutá pryskyřice může dráždit holou kůži a může způsobit vyrážku tzv. kontaktní dermatitidu. Ta může být nakonec závažnější a způsobit alergickou reakci po delším kontaktu s pokožkou. Několik přísad ve spotřebitelských pryskyřicích pro 3D tisk (včetně prepolymerů a změkčovadel) může být též škodlivých pro lidské oči. Pryskyřice by nikdy neměla být požívána v kapalně nebo pevné formě. Pokud dojde k náhodnému spolknutí je nutné okamžitě vyhledat lékařskou pomoc od toxikologického specialisty. Některé fotoiniciátory mají totiž významnou úroveň orgánové toxicity. Stejně jako většina materiálů FDM tisku nejsou ani pryskyřice ve vytvrzeném stavu bezpečné pro potraviny, takže procesy jako SLA a DLP by neměly být používány k přímé výrobě produktů, jako jsou nádoby na potraviny, vykrajovátka na sušenky nebo nádoby na pití. [37] [38]



Obrázek 34: Biologické pryskyřice na rostlinné bázi. [33]

Tekuté pryskyřice pro 3D tisk uvolňují výpary nebo páry obsahující těkavé organické sloučeniny (VOCs), které mohou být pro člověka též škodlivé, pokud jsou vdechovány do krku a plic. I jenom krátkodobé vystavení výparům pryskyřice může způsobit závratě, bolesti hlavy a podráždění krku. Dlouhodobá rizika však nejsou prozatím známa kvůli nedostatku výzkumů, ale mohou určitě zahrnovat zvýšené riziko rakoviny. Dále jsou tyto pryskyřice škodlivé pro životní prostředí a měly by být klasifikovány jako toxický odpad. To znamená, že by nikdy neměly být nality do odtoků nebo přímo do vodních útvarů, ale místo toho by měly být bezpečně lahvovány a zlikvidovány prostřednictvím vyhrazených toxických odpadních kanálů. Fotopolymerní pryskyřice jsou znečišťující látkou, která může zabíjet mořský život a zničit ekosystém. Plně vytvrzená UV pryskyřice je méně ekologicky škodlivá než kapalná, a proto je snazší ji likvidovat. Alternativně je

možné použít biologické pryskyřice (obrázek 34), které jsou mnohem méně škodlivé pro životní prostředí, a to i v jejich tekuté formě. [33] [38]

Přestože jsou tekuté pryskyřice pro 3D tisk toxické, potenciálně dráždí pokožku a uvolňují škodlivé výpary, lze je bezpečně používat, pokud jsou přijata příslušná bezpečnostní opatření. Mezi taková opatření patří používání osobních ochranných prostředků, jako jsou ochranné brýle a nitrilové rukavice, stejně jako vhodné nádoby na likvidaci. Vzhledem k tomu, že tekuté pryskyřice uvolňují páry, které mohou při vdechnutí poškodit hrdlo a plíce, je nutné používat pryskyřičné tiskárny v řádně větraných prostorech. Nejlepším řešením je při práci s pryskyřičnými výpary mít nad pracovním prostorem ventilační digestoř, která zajistí, že škodlivé výpary budou z místnosti odváděny co nejúčinněji. V prostředích, kde toto nastavení není možné, by měl být pracovní prostor umístěn alespoň blízko od otevřeného okna. Uživatelé těchto tiskáren by také měli vytvořit neporézní pracovní prostor, jako je skleněný stůl nebo povrch pokrytý plastovou fólií. Zabrání se tak prosakování škodlivé pryskyřice například do dřevěných povrchů. [8] [38]

Všichni výrobci tekutých pryskyřic pro 3D tisk musí pro každý materiál poskytnout bezpečnostní list SDS (Safety Data Sheet). Tyto dokumenty poskytují informace o složkách materiálu (i když někdy ve velmi omezené míře kvůli obchodním tajemstvím), jeho úrovních toxicity a vhodných bezpečnostních opatřeních, která je třeba přijmout při práci s produktem. Při manipulaci s toxickými UV pryskyřicemi je bezpodmínečně nutné používat ochranné nitrilové rukavice, které zabrání možnému podráždění pokožky v případě malých rozlití. Nitrilová pryž, i když není tak flexibilní, nabízí vynikající chemickou odolnost vůči jiným formám pryže. [38]



Obrázek 35: Zacházení s odpadem – toxické tekuté pryskyřice. [38]

Při manipulaci s UV pryskyřicemi (obrázek 35) by se měly používat bezpečnostní brýle nebo jakékoliv jiné brýle, protože tyto materiály obsahují několik složek, které mohou být pro oči škodlivé. I v dobře větrané místnosti by operátoři měli

nosit respirátor, aby se zabránilo vdechování výparů z pryskyřic. Nevyužitá pryskyřice nemusí procházet 3D tiskárnou, může být vytvrzena i jinými způsoby. Může být např. ponechána v čiré nádobě na přímém slunečním světle. UV paprsky ze Slunce mohou zastoupit světelný zdroj tiskárny a dokáží provést proces vytvrzování. Nádobu s tvrzenou pryskyřicí lze poté zlikvidovat jako pevný odpad. Papírové ručníky zašpiněné kapalnou pryskyřicí by měly být též ponechány na Slunci (ve ventilované oblasti) a před likvidací ponechány ke ztuhnutí. [38]

Jelikož nevytvrzené tekuté pryskyřice mohou zabíjet mořské živočichy, nelze je vylít do dřezu, ani spláchnout do záchodu, či vyhodit s běžným odpadem. Likvidace UV pryskyřic může být prostřednictvím chemického odpadu (nevytvrzená tekutá pryskyřice) nebo jednodušeji bez využití chemického odpadu (vytvrzená pryskyřice). Nevytvrzenou kapalnou pryskyřicí lze likvidovat jen a pouze prostřednictvím vhodného chemického odpadu organizovaného místními úřady, typicky uložením materiálu v utěsněné nádobě a jeho doručením do zařízení pro nakládání s odpady. V Evropě na uplatňování rámcové směrnice o odpadech dohlíží Evropská komise. Jakmile je pryskyřice vytvrzená, může být zlikvidována s běžným odpadem z domácnosti. Biologické pryskyřice jsou odvozeny z přírodních zdrojů, jako je lignin, mastné kyseliny a kafr, tyto materiály nejsou škodlivé pro životní prostředí jako běžné pryskyřice. Vědci dokázali, že biologické pryskyřice mohou podat výkon ekvivalentní s běžnými epoxidovými pryskyřicemi během SLA procesu tisku. V současné době jsou k dispozici 3D tiskové pryskyřice založené na kukuřičném škrobu, cukrové třtině, sóje a biokatalyzátorech. [8] [33] [38]

6.5 3D tisk v porovnání s jinými druhy pracovišť

Snad každý, kdo byl někdy v kovoobráběcím závodě ví, že to může být velmi špinavé místo, ale naopak i velmi čisté. Svařování a další kovoobráběcí operace vytvářejí nejen nebezpečné úlomky materiálů, ale také nebezpečné znečišťující látky, které mohou představovat vážné ohrožení zdraví pracovníků. Mezi tyto znečišťující látky patří prachové částice, olejová mlha, výpary obsahující mangan, olovo, šestimocný chrom a další toxické prvky. Z těchto důvodů je vydána celá řada právních předpisů a opatření, které musí podniky dodržovat. Některé kovoobráběcí závody se též rozhodly podniknout kroky ke splnění ještě přísnějších pokynů pro kvalitu vnitřního ovzduší. [35]

Většinu problémů s kvalitou vzduchu v kovoobráběcích závodech lze přiřadit ke kouři a výparům ze svařování, které se liší svou toxicitou podle typu svařovacího procesu, základního kovu, použitých přídavných kovů a složení svařovacího hořáku. Například svařování plynovým wolframovým obloukem produkuje méně výparů než obloukové svařování. Podle OSHA (Occupation Safety and Health Administration – Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci)

můž e akutní vystavení výparům ze svařování vést k podráždění očí, nosu a krku, můž e vyvolat závrať a nevolnost. Dlouhodobé vystavení výparům ze svařování můž e způsobit poškození plic a různé typy rakoviny (rakovinu plic, hrtanu a močových cest). Zdravotní účinky některých výparů mohou zahrnovat horečku z kovových výparů, žaludeční vředy, poškození ledvin a poškození nervového systému. Plyny jako helium, argon a oxid uhličitý vytlačují kyslík ze vzduchu a mohou vést k udušení, zejména při svařování v uzavřených prostorách. Můž e se též tvořit plynný oxid uhelnatý, který představuje vážné nebezpečí udušení. [35]

Zvláštní obavy vzbuzují tři vzduchem přenášená nebezpečí společná pro svařování. Prvním je olejová mlha, která je přirozeným vedlejším produktem zpracování kovů a představuje nebezpečí uklouznutí a pádu. Kromě toho bylo prokázáno, že vystavení těmto látkám ve vzduchu způsobuje respirační onemocnění, alergie, kožní onemocnění, a dokonce i rakovinu. Další nebezpečí můž e představovat šestimocný chrom neboli Cr(VI), vznikající během procesu svařování z chromové složky, která se nachází ve svařovacích přídavných materiálech. Při dopadu elektrického oblouku na lesklý kov vznikají výpary, které jsou vysoce toxické a mohou poškodit oči, kůži, nos, hrdlo a plíce. Je také často spojován s rakovinou. Posledním nebezpečím zůstává mangan, jakožto stopový prvek, který se nachází prakticky ve všech typech svařování. Můž e způsobit stav zvaný manganismus, který je podobný Parkinsonově chorobě. V extrémních případech můž e nadměrné vystavení výparům manganu ovlivnit centrální nervový systém a změnit neuropsychologické a neurobehaviorální funkce. [35]

Pro zajištění těchto výparů je nutné přistoupit k zavádění různých ventilačních systémů, čističek ovzduší, odsávacích přístrojů atp. V konečném důsledku, porovnání kovoobráběcích závodů s pracovišti 3D tisku nelze tak napřím o zhodnotit. Každá technologie výroby používá své různé speciální materiály a nástroje, které se dosti liší. Je ale možné dojít k závěru, že všechny technologie výroby součástí uvolňují do vzduchu částice, které jsou pro lidské zdraví škodlivé a mohou způsobovat různé zdravotní problémy, které mohou skončit rakovinou a třeba i následnou smrtí. Je proto nutné používat vhodné nástroje pro odstraňování těchto překážek ve výrobě a zamezit tak kontaktu uvolňovaných částic s člověkem.

6.5.1 Hygienické limity v pracovním prostředí

Prakticky v každém pracovní prostředí se mohou vyskytovat různé rizikové faktory, kterým je povinností zaměstnavatelů předcházet a minimalizovat tak jejich negativní působení. Soubor těchto povinností je obsažen zejména v zákoníku práce (zákon č. 262/2006 Sb., v platném znění). Hygienické limity jsou stanoveny pro všechny známé a objektivně stanovitelné a hodnotitelné faktory, které mohou mít negativní vliv na zdraví člověka. Hlavními faktory jsou fyzikální faktory (např.

prach, hluk, vibrace, elektromagnetická zátěž apod.), poté též chemické a biologické faktory, pracovní poloha, fyzická, psychická a zraková zátěž a práce ve zvýšeném tlaku vzduchu. Hygienické limity pro jednotlivé tyto typy zátěží jsou v České republice stanoveny tak, aby při jejich dodržení běžný zaměstnanec mohl pracovat bez ohrožení zdraví po celou dobu svého pracovního života. [39]

Vyhláška č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí místností některých staveb. Jsou zde stanoveny limitní hodinové koncentrace chemických ukazatelů a prachu. Důležitým parametrem pro tuto práci jsou zde hodnoty frakce prachu PM10 (prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 10 μm , které projdou speciálním selektivním filtrem s 50% účinností), které mohou dosahovat maximálně $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. A dále také hodnoty frakce prachu PM2,5 (prachové částice s převládající velikostí částic o průměru 2,5 μm , které projdou speciálním selektivním filtrem s 50% účinností) s krajním limitem $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. [40]

Důležitějším dokumentem však zůstává nařízení vlády č. 361/2007 Sb., které stanovuje podmínky ochrany zdraví při práci. V tomto nařízení jsou uvedeny přesné limity pro prachové částice ve vzduchu na pracovišti, jedná se o přípustný expoziční limit pro celkovou koncentraci (vdechovatelnou frakci) prachu a označuje se jako PEL_c. Vdechovatelnou frakci prachu se poté rozumí soubor částic polévatého prachu, které mohou být vdechnuty nosem nebo ústy. Pro prach s převážně nespecifickým účinkem platí limit $10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cílem této kapitoly práce je však porovnat prachové částice ve vzduchu během 3D tisku (použitý materiál polyethylen) s prachem ve vzduchu během standardního obrábění železa a jeho slitin, v neposlední řadě také porovnáváme se svařeckými dýmy během svařování. Limitní hodnota prachu s dráždivým účinkem, tedy hodnota polyethylenu při tisku je $5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro železo a jeho slitiny při obrábění se poté dostáváme na dvojnásobek této hodnoty, a to sice na $10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, protože železo není tolik toxické. Při svařování, kdy se do ovzduší dostávají jedovaté svařecké dýmy je pak hodnota shodná s plastovým tiskem, tedy $5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. [41]

Po zhodnocení těchto nařízení a vyhlášek je možné říci, že prostředí s 3D tiskárnami je omezeno stejnými limity, které jsou určeny pro svařování, neznámá to však, že tyto dvě prostředí jsou na tom z hlediska prachových částic ve vzduchu stejně nebo jsou stejně škodlivá. Jak již bylo popsáno v kapitolách výše, každé prostředí je specifické svými používanými materiály a pomůckami. Zároveň také každé pracoviště používá jiné odvětrávací systémy, které odstraňují různorodé částice způsobující ve velkém množství rozličné zdravotní komplikace.

6.6 Přihlédnutí k ergonomii pracoviště

Dalším důležitým parametrem při návrhu pracoviště je ergonomie, ke které je jistě důležité též přihlédnout a nenechat ji bez povšimnutí. Ergonomie jako taková se stává velmi probíraným tématem ve spoustě firem, protože se zabývá výkonností, zdravím a bezpečností zaměstnanců. Většina pracovních úkonů a prostředí je v současné době zkoumána a poté dále optimalizována podle ergonomických kritérií, s cílem co nejvíce snížit zdravotní rizika a také maximalizovat výkonnost pracovníků. Největší prioritou se tu stává prevence předcházení škod způsobených těžkou, nesprávnou nebo nadměrně stresující prací, podobně jako u ochrany zdraví při práci. Hlavním cílem je optimální přizpůsobení pracovních podmínek lidem (viz ČSN EN ISO 9241-210 – norma vypovídá o ergonomii systémových interakcí člověka). [42]

Fyzická ergonomie má za úkol optimalizovat design zařízení a pracovního prostředí, patří sem kritéria jako např. pracovní výšky, dosah pracovní plochy, osvětlení, hluk, klima, vibrace, typ podlahy. Pohyb a činnosti, které vykonává pracovník (otáčení a ohýbání) také patří do tohoto druhu ergonomie. Pro posuzování, zda je daná činnost ergonomická se posuzují aspekty jako postoj, pohyby těla, hmotnost dílu nebo nosiče nákladu, počet opakování nebo též doba trvání polohy. Naopak kognitivní ergonomie se zabývá lidskou psychikou, psychologické faktory, např. spokojenost, motivace, multitasking, změna pracovní zátěže, monotónnost, únava a stres, mají též velký vliv na zdraví zaměstnanců i na kvalitu práce. [39] [42]

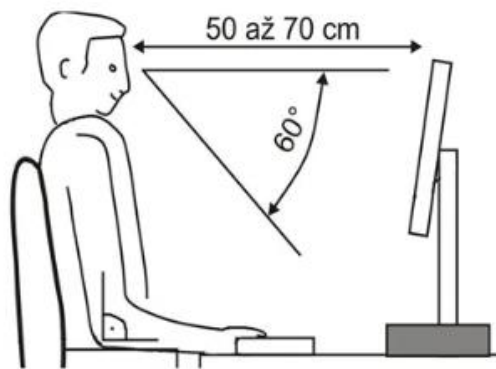
Hlavními cíli ergonomie je zvyšování lidské výkonnosti, zachování lidského zdraví a zajištění lidské bezpečnosti. Prostřednictvím preventivní bezpečnosti práce a designu ergonomických pracovišť, pracovního prostředí a činností lze dosáhnout těchto cílů. Samotným výsledkem jsou poté efektivnější procesy, snížení počtu nemocí z povolání a mnoho dalšího. Výhodami správné ergonomie jsou zdraví zaměstnanci, jejich vyšší spokojenost, méně absencí (snížení počtu pracovních neschopností), vyšší výkonnost, lepší kvalita pracovních výsledků, optimalizovaný pracovní postup a využití dostupného prostoru, ekonomický úspěch podniku. Naopak mezi nevýhody se řadí velké počáteční výdaje času a nákladů na plánování a též poté průběžné vynakládání času a nákladů na následnou analýzu. [42]

Pracoviště jako takové je považováno za ergonomické, pokud bylo posouzeno a navrženo v souladu se zásadami bezpečnosti a ochrany zdraví při práci. Do tohoto posouzení lze zahrnout podrobnou analýzu pracovních úkolů a časů, dále měření poloh a pohybů těla, výběr nástrojů a vybavení nebo zavádění účinných řešení, která snižují zátěž způsobenou únavou nebo přetížením. Měření ergonomie lze provést i posouzením čtyř kritérií. Prvním kritériem je bezpečnost, dále poté efektivita, komfort a nakonec výkon. Doporučením ke zlepšení ergonomie pracoviště mohou být tyto tipy: integrování výškového nastavení,

flexibilní zásobování materiálem, flexibilní pracovní vybavení, poskytnutí co nejvíce informací operátorům, ergonomická světla (nastavitelná, přizpůsobitelná intenzita), omezení hluku a obecně zvuků, využití barevného kódování, fyzické úlevy pro zaměstnance. [39] [42]

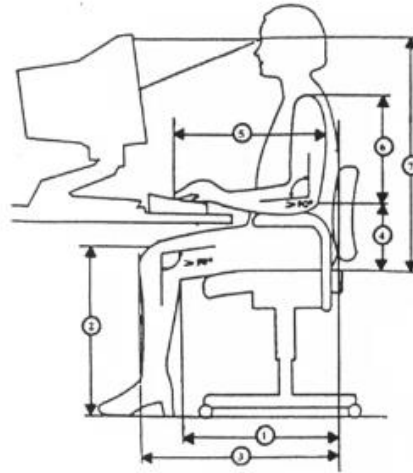
6.6.1 Ergonomie pracovního místa

Mezi důležité faktory, kterými lze charakterizovat pracovní místo, patří zorné podmínky, které však závisí na spoustě podnětech. Je nutné se zaměřit na druh vykonávané práce, například když se jedná o práci spojenou s používáním zvětšovacího přístroje, nebo také sledování monitorů či zobrazovacích jednotek (stolní počítač, zapisovací a měřicí technika). Důležité je také správné uspořádání pracovního místa, kdy musí být pracoviště uspořádáno tak, aby pracovník viděl na všechny potřebné předměty, pomůcky apod. V neposlední řadě závisí na zdravotním stavu pracovníka z hlediska zrakových vad. Optimální zorné podmínky jsou vyobrazeny na *obrázku 36*. [42] [43]



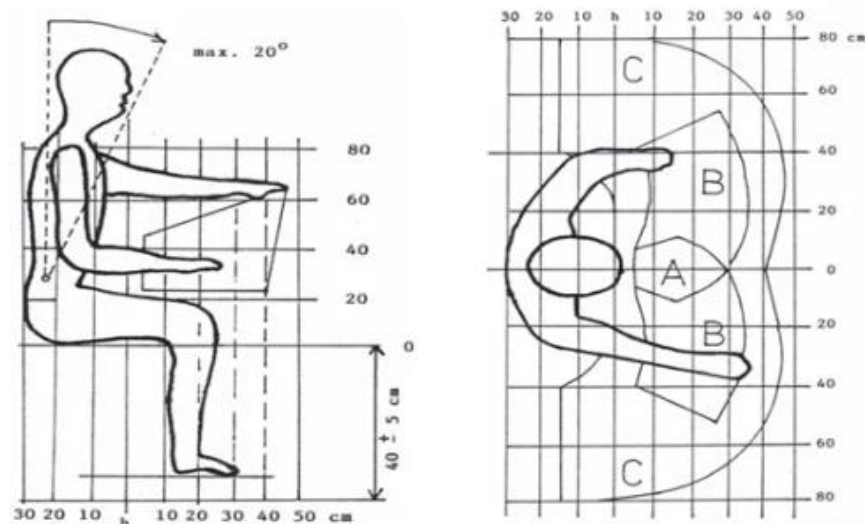
Obrázek 36: Optimální zorné podmínky pro práci na PC. [43]

Dalším podstatným faktorem může být pracovní poloha, kterou se rozumí poloha těla, v níž je daná práce vykonávána. V jakékoliv pracovní poloze musí být zajištěna dostatečná stabilita celého těla a je nutné zabránit nadměrnému zatěžování muskuloskeletálního systému a je nutné volit takové polohy, které jsou ze zdravotního hlediska vyhovující. Pro pracovní činnosti jako jsou kancelářské práce, práce na velínech, u montážních linek, je charakteristická stabilní poloha vsedě. Hlavní zásadou je sedět vzpřímeně, využívat zádové opěry, opěrky šije, hlavy a loktů, aby jednotlivé končetiny svíraly tupé úhly (noha – bérce – stehna – trup – paže – předloktí – ruka) a také mít správně nastavenou výšku sedadla. Držení těla při sezení musí být tedy takové, aby při symetrické orientaci trupu, krku a hlavy k rovině souměrnosti těla bylo vyloučeno vytáčení trupu. Součástí správného sedu je také nutné zajistit, aby osa ramen byla rovnoběžná s osou pánve (*obrázek 37*). [43]



Obrázek 37: Správná poloha vsedě při práci na PC. [43]

Při práci vyžadující změnu pracovní polohy se musí zajistit dostatečná volnost a plynulost pohybů, přičemž se zapojují určité svalové skupiny, pohyb by měl být nerušený a plynulý, dle technologického/pracovního postupu. Polohy krku a hlavy musí být uzpůsobeny tak, aby nedocházelo k nevhodným záklonům či předklonům. Trvalá práce vstoje nebo vsedě se klasifikuje jako práce v nucené poloze, tato práce je definována jako fyziologicky nepříznivá. Dochází totiž k nadměrnému zatížení některých částí těla vlivem statického namáhání svalů. Mezi nejčastější zdravotní problémy pak patří nateklá chodidla a vznik křečových žil. [42] [43]



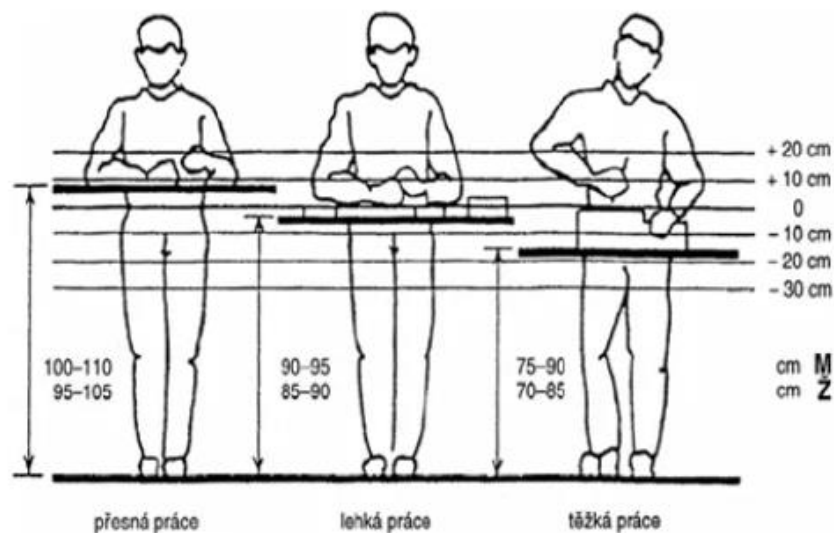
Obrázek 38: Vyhovující pracovní pohyby. [43]

Pracovní pohyby by se měly vykonávat v takové míře a v takového rozsahu, aby nedocházelo k přetěžování. Jestliže se mají při práci používat obě ruce, je potřeba zajistit rovnoměrné zatížení obou končetin, aby mohly pracovat současně. Střed

dlaní musí vykonávat pohyby souměrně s rovinou těla a ruce by měly být při práci vsedě v takové výšce a dosahovat takových vzdáleností, aby se nepřetěžovaly používané svalové skupiny. Na *obrázku 38*: oblast A – časté a přesné pohyby, oblast B – pohyby obou předloktí a při manipulaci s předměty a nástroji bez nutnosti změny základní polohy, oblast C – maximální dosah (méně časté a pomalejší pohyby). Optimální výška pracovní roviny nad sedákem je u mužů 220–310 mm a u žen 210–300 mm. [43]

Při vykonávání pracovních pohybů se nesmí narážet do okolních předmětů nebo jinými způsoby zvyšovat riziko mechanického poranění. Pohyby pracovníků musí být tedy rytmické, plynulé a prováděné takovými rychlostmi, které odpovídají pohybování daných částí těla po drahách přímých, nikoliv po klikatých křivkách. Podle nařízení vlády č. 361/2007 Sb., v platném znění, musí být pro jednoho pracovníka v prostoru určeném pro trvalou práci volná podlahová plocha nejméně 2 m², mimo stabilní provozní zařízení a spojovací cesty. Šíře volné plochy pro pohyb nesmí být stabilním zařízením v žádném místě zúžena pod 1 metr. [41]

Konstrukce pracovní roviny by měla odpovídat práci na ní vykonávané, také používaným technologiím, pracovnímu prostředí, a především pak samotnému pracovníkovi. Přední strana stolu musí mít zaoblený okraj a povrch musí být matný, snadno čistitelný a jeho povrch by měl být odolný nasákavosti vody. Svým tvarem a rozměry musí odpovídat tělesným proporcím pracovníka. Doporučenými rozměry výšky pracovní plochy jsou obecně 5–10 cm pod úroveň loktů, pro jemnou práci 5–10 cm nad úroveň loktů, pro manuální práce 10–15 cm pod úroveň loktů a pro vykonávání těžkých prací 15–40 cm pod úroveň loktů. Výška pracovní roviny se může zvětšovat o 100–200 mm v závislosti na zrakové náročnosti či manipulaci s drobnými předměty. Naopak manipulací s předměty těžšími než 2 kg se manipulační rovina snižuje o 100–200 mm. [41] [43]



Obrázek 39: Výška pracovní roviny vestoje. [43]

Existuje také obecné doporučení pro výšku pracovní roviny (obrázek 39), které se stanovuje podle výšky postavy pracovníka. Člověk s výškou 155 cm by měl mít výšku plochy 60 cm, člověk vysoký 170 cm pak 65 cm a člověk vysoký 185 cm poté 70 cm. Vhodné výšky lze dosáhnout například nastavitelnými nohami stolu nebo systémem výškového nastavení. Přizpůsobitelnost provozním a technologickým podmínkám má umožnit snadnou přemístitelnost stolů, připevnění upínacích zařízení na stoly (polohovadla, svěráky) a také možnost připevnění zábrany proti padání předmětů ze stolu. Důležité je též zajistit dostatečný prostor pro dolní končetiny pod pracovní deskou stolu. [43]

Konstrukce pracovního sedadla musí plně vyhovovat tělesným proporcím pracovníka, který ho používá. Musí být vyrobeno tak, aby při jeho použití byla rovnoměrně rozložena hmotnost pracovníka a pro udržení požadované pracovní polohy bylo vynakládáno minimální úsilí. Důležitým faktorem je, že nesmí dojít k narušení cirkulace krve, dýchání, útlaku tkání nebo dermatologickým onemocněním. Konstrukce sedadla nesmí bránit požadovaným pracovním pohybům končetin, trupu a hlavy, ani pohybům je doprovázejícím a je třeba umožnit plný rozsah. Sedadlo musí být v každé poloze stabilní, zejména pak při vstávání a usedání. Jednotlivé funkční prvky sedadla musí být jednoduše nastavitelné (obrázek 40). Vhodná je i tepelná ochrana na stykových plochách. Pro vhodný úhel v koleni člověka s výškou postavy 155 cm je doporučeno nastavení výšky sedáku 41 cm, pro člověka 170 cm vysokého pak 46 cm a pro člověka 185 cm vysokého poté 52 cm. [42] [43]



Obrázek 40: Možnosti polohování kancelářské židle. [43]

Pracovní podmínky se mimo jiné týkají i všech pracovních nástrojů a předmětů, které jsou využívány při práci. Musí být přehledně umístěny, vždy v dosahu a v náležitém pořádku. Pokud vznikají při práci nějaké odpady, musí být ihned odstraněny z pracovního místa. Podle nařízení vlády č. 361/2007 Sb., v platném znění, je nutné, aby světlá výška prostor určených pro práci byla pro podlahovou plochu: do 20 m² nejméně 2,5 m; do 50 m² nejméně 2,6 m; od 51 do 100 m² nejméně 2,7 m; od 101 do 2 000 m² nejméně 3 m; více než 2 000 m² nejméně 3,25 m. [43]

7 Návrh pracoviště 3D tisku

Závěrečná část této práce se zabývá samotným návrhem ideálního pracoviště 3D tisku. Ke každé zvolené technologii (FDM a SLA technologie 3D tisku) je zde zkonstruován jeden 3D model místnosti, který vychází ze všech předchozích kapitol této práce. Návrhy byly zpracovány za pomoci volně distribuovaného programu na internetu, který nese název HomeByMe, pro lepší představu o celkovém rozložení všech komponent v místnostech.

7.1 Návrh dvou různých prostor

Cílem této kapitoly je konečný návrh pracovišť 3D tisku, který je výsledkem důkladného rozboru všech podstatných částí této práce. Ke každé technologii je tedy optimalizované jedno pracoviště, které vychází nejenom ze současných trendů, ale je též přizpůsobeno zdraví pracovníků.

7.1.1 FDM tisk

Pracoviště FDM tisku je rozděleno na dvě části kvůli bezpečnosti, vyplývající z prostudovaných studií o působení 3D tisku na lidský organismus. První částí je samotná laboratoř 3D tisku, kde jsou rozdělené části pro tisk jako takový a také pro následný postprocessing. Tyto prostory jsou částečně oddělené příčkou, respektive stěnou, která prochází téměř středem místnosti a dělí jí tak napůl. Velikost tohoto prostoru je přibližně 61,4 m². Naproti tomu oddělená kancelář, sloužící pro předpřípravy a přípravy tisku, má velikost pouze 15,2 m². Do této místnosti je přístup možný jak z laboratoře, tak poté i zvlášť, například z chodby. Důležitým prvkem jsou zde dva průhledy v různých výškách, které umožňují vidět z kanceláře do laboratoře, a to přímo na tiskárny. Jeden průhled je umístěn ve výšce kancelářské židle a druhý je určen pro pozorování vestoje. Kancelář má vlastní posuvné okno pro lepší manipulaci z důvodu umístěného stolu pod ním. Nachází se tam též skříňka s policí (regálem), která slouží na zakládání dokumentace a jiných potřebných pracovních dokumentů. Na stěně visí obraz a za dveřmi je umístěna květina. Součástí kanceláře je i bílá tabule pro plán výroby a dvě přídavné židle pro pohodlnější sezení. Nechybí ani čistička vzduchu.

Laboratoř 3D tisku disponuje třemi velkými okny a také jsou v ní umístěny dvě samostatné ventilace. Ihned nad otevřenými tiskárnami je poté digestoř na odsávání uvolňovaných částic. U hlavního vchodu se nachází věšák a police na ochranné pomůcky, poblíž také nechybí velká skříň, jejíž obsah byl již popsán v jiných kapitolách této práce. V tomto prostoru nechybí ani dva zásobníky na odpad či odpadkový koš. Na pracovním stole pro postprocessing je připevněn svěrák a též se zde nachází lampička s policí. Židle je pracovní, bez koleček, aby se

zabránilo samovolnému pohybu při práci. Na plánu půdorysu níže (obrázek 41) je též demonstrováno rozmístění osvětlení. Následují jednotlivé obrázky rozdělených částí pracoviště, pořízené ve vybraném softwaru HomeByMe.



Obrázek 41: Půdorys pracoviště FDM tisku.



Obrázek 42: 3D pohled na pracoviště FDM tisku.



Obrázek 43: Místo pro postprocessing – pracoviště FDM tisku.



Obrázek 44: Místo pro tisk – pracoviště FDM tisku.



Obrázek 45: Místo pro tisk 2 – pracoviště FDM tisku.



Obrázek 46: Rozložení místností – pracoviště FDM tisku.



Obrázek 47: Oddělená kancelář – pracoviště FDM tisku.

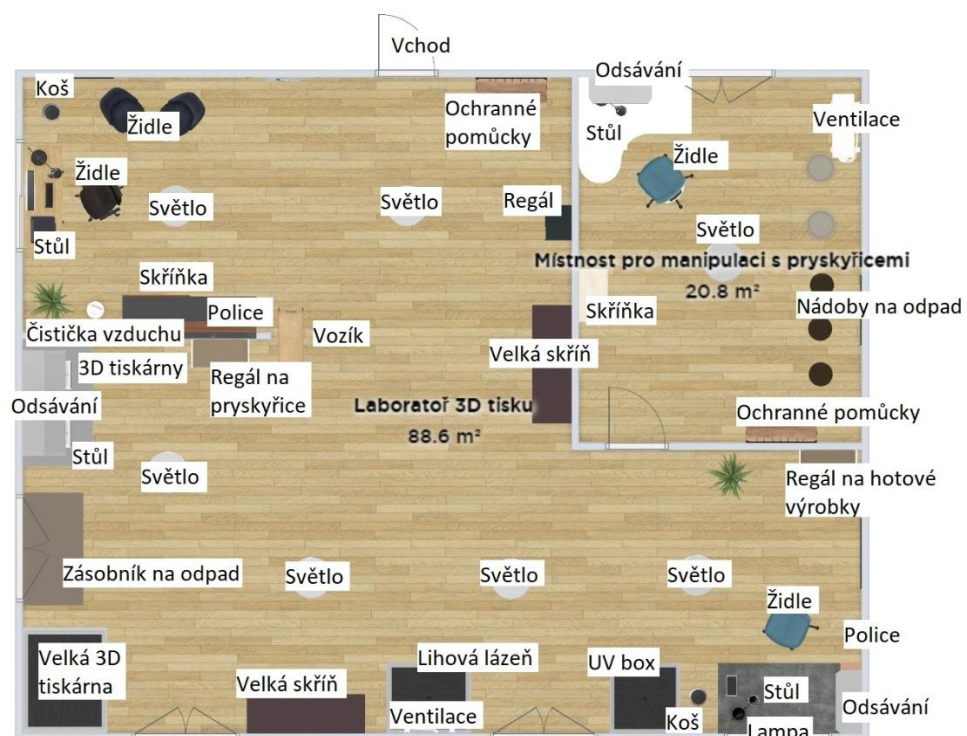


Obrázek 48: Oddělená kancelář (pohled 2) – pracoviště FDM tisku.

7.1.2 SLA tisk

Pracoviště SLA tisku je též rozděleno na dvě části, avšak jinak než pracoviště předešlé, a to na část sloužící jako laboratoř 3D tisku a poté na místnost určenou pro manipulaci s pryskyřicemi, viz *obrázek 49*. U tohoto typu pracoviště není nutné zcela izolovat kancelář pro předpřípravy a přípravy tisku, proto se stala součástí celého prostoru laboratoře. Místnost využívá téměř stejné vybavení jako pracoviště FDM tisku, liší se pouze ve speciálních přístrojích pro danou technologii. V prostoru se nachází celkem čtyři velká okna a jedno posouvací, ze stejného důvodu jako v předešlém prostoru. Laboratoř je rozdělena do tří menších prostorů, a to na kancelář, která je od prostoru k tisku oddělena příčkou, tedy stěnou, dále v prostoru je poté místo připravené na postprocessing. Oddělovací stěna je opatřena též dvěma průhledy, které umožňují kontrolu tisku z prostoru kanceláře. Celkové prostory jsou jinak otevřené. Velikost laboratoře je přibližně 88,6 m² a je opatřena jednou ventilací, čističkou vzduchu a digestoří přímo nad tiskárnami.

K tomuto prostoru bylo nutné vytvořit samostatnou místnost, která slouží k manipulaci s pryskyřicemi. Tento prostor má velikost 20,8 m² a je opatřen jedním velkým oknem. Nachází se zde také ventilace, protože okno není dostatečné odvětrávání pro výpary z tekuté pryskyřice. Místnost je též opatřena velkým pracovním stolem s židlí, skříňkou a věšáky na ochranné pomůcky, které jsou zde velmi důležité. Je zde možné nalézt také různé velké nádoby na odpad v podobě vytvrzené, ale i tekuté pryskyřice. Přístup do této místnosti je možný pouze z laboratoře 3D tisku. Následují obrázky jednotlivých prostor pracoviště.



Obrázek 49: Půdorys pracoviště SLA tisku.



Obrázek 50: 3D pohled na pracoviště SLA tisku.



Obrázek 51: Kancelář pracoviště SLA tisku.



Obrázek 52: Kancelář pracoviště SLA tisku (pohled 2).



Obrázek 53: Místo pro tisk – pracoviště SLA tisku.



Obrázek 54: Místo pro postprocessing – pracoviště SLA tisku.



Obrázek 55: Oddělená místnost pro manipulaci s odpadem – pracoviště SLA tisku.



Obrázek 56: Oddělená místnost pro manipulaci s odpadem – pracoviště SLA tisku (pohled 2).

7.2 Zhodnocení návrhů pracovišť

Obě pracoviště 3D tisku, jak už pro technologii FDM, tak také pro technologii SLA, byla navrhována na základě všech informací obsažených v této práci. Tato pracoviště byla postupně optimalizována, a nakonec byly vybrány nejlepší varianty. Na začátku navrhování zde bylo několik rozpracovaných návrhů, ze kterých se postupně vybraly nejlepší části a spojily se pak do jednoho nejlepšího návrhu.

Nejprve bylo u pracoviště FDM tisku vyhodnoceno, že nejlepší návrh bude takový, v kterém se laboratoř 3D tisku oddělí od samostatné kanceláře, s tímto konceptem se poté nadále pracovalo. Zjištěným problémem po takovémto návrhu byla dále ztížená kontrola průběhu tisku, z tohoto důvodu byly do oddělující zdi umístěny dva průhledy (okna), které zajišťují neustálou kontrolu nad pracovištěm vedle. K oddělení kanceláře bylo přistoupeno z důvodu nastudování několika studií, které zjistily, že FDM tisk může způsobovat závažné zdravotní problémy po dlouhodobém vystavení výparům v průběhu tisku. Důležitým aspektem zde byl také počet oken, který je nakonec takto dostačující.

Na rozdíl od FDM tisku není SLA tisk tolik škodlivý (zakrytování), aby bylo nutné oddělení kanceláře, proto byl ponechaný koncept otevřeného prostoru. Během tvorby se však vyskytl problém s hospodařením s pryskyřicemi. Proto zde byla navrhována místnost určená pouze k jakékoliv manipulaci s pryskyřicemi, její vybavení bylo též dost diskutované, a nakonec se dospělo k názoru, že nutností je velké okno, ventilace a samozřejmě patřičné ochranné pomůcky. Po celkovém zhodnocení je o obou pracovištích možno říci, že se jedná o optimalizovaná pracoviště podle zdravotního hlediska s přihlédnutím k nejnovějším trendům.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a optimalizovat ideální pracoviště 3D tisku, a to konkrétně pro technologie FDM a SLA. Nejprve je zde uveden obecný pohled na 3D tisk a bližší rozebrání vybraných dvou technologií i z hlediska materiálů, či nutných strojů, nástrojů a pomůcek k práci s nimi. Celé pracoviště je poté rozděleno do tří podstatných částí, které na sebe navazují a výrobek jimi postupně prochází až do konečné fáze. Nutné bylo zvolit správné pořadí jednotlivých operací pro ulehčení následné tvorby prostor pracoviště, což se nakonec podařilo.

Nejpodstatnějším faktorem pro návrh pracovišť zde byla zdravotní rizika spojená s uvolňovanými mikročásticemi do vzduchu během tisku. V práci je obsažen rozbor nejpodstatnějších studií, které se v minulosti věnovali této problematice. Z těchto materiálů později také vychází výsledné návrhy. Bylo nastudováno několik vyhlášek a vládních nařízení, podle kterých se poté porovnávalo pracoviště 3D tisku jako takové i s jinými druhy provozů, konkrétně s pracovištěm obrábění a svařování. Dalším důležitým parametrem pro samotný návrh bylo přihlídnutí k ergonomii pracovního místa z důvodu nejenom pracovní pohody zaměstnanců, ale i z důvodu předcházení nemocí z povolání či jiných zdravotních problémů.

V závěru práce bylo pozvolna přistoupeno k návrhům a následné optimalizaci pracoviště FDM a SLA tisku. Po zhodnocení všech předchozích kritérií se naskytl pohled na přibližný návrh, který se postupně upravoval do konečné podoby. Vizualizace místností byla provedena ve volně přístupném programu HomeByMe, určeném převážně pro tvorbu interiéru bytů, pro tyto účely se však nakonec ukázal jako nejvhodnější, protože v něm bylo možné se co nejvíce přiblížit skutečné podobě pracovišť.

Tento obecný návrh bohužel nemůže zohledňovat konkrétní požadavky zaměstnanců a předem daných aplikací, proto je zde možnost při realizaci upravit prostory na míru. Tato práce má řadu přínosů, a to už ve zjištěných informacích jako takových nebo v provedeném experimentu, či také v návrzích jednotlivých pracovišť.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vytištěné výrobky pomocí technologie 3D tisku. [1]	13
Obrázek 2: FDM/FFF tisk. [9].....	15
Obrázek 3: Princip nanášení vrstev při FDM tisku. [10].....	16
Obrázek 4: Filament pro 3D tiskárnu. [11]	17
Obrázek 5: Porovnání jednotlivých materiálů pro FDM tisk. [13].....	19
Obrázek 6: Způsob tisku pomocí technologie SLA. [14].....	21
Obrázek 7: Způsob tisku a ukázka materiálů pro tisk metodou SLA. [16]	22
Obrázek 8: Porovnání kvality výtisků technologií FDM a SLA. [18].....	24
Obrázek 9: Stolní 3D tiskárna MakerBot Replicator+. [20].....	25
Obrázek 10: Original Prusa i3 MK3S+. [21]	26
Obrázek 11: 3D tiskárna Stratasys F370. [22].....	26
Obrázek 12: Formlabs Form 3+. [23]	26
Obrázek 13: Stratasys Neo 450. [24]	26
Obrázek 14: Diagram jednotlivých kroků během celého procesu 3D tisku. [1]	27
Obrázek 15: Rozpustné podpory z PVA. [26].....	29
Obrázek 16: Vzory výplně v závislosti na jejich hustotě. [1].....	32
Obrázek 17: Přílnavost výtisku za pomoci různých nástrojů. [6]	32
Obrázek 18: Průběh 3D tisku za použití technologie FDM. [4]	33
Obrázek 19: Vyztužování výtisku laminátem. [27].....	35
Obrázek 20: Drybrushing. [28].....	36
Obrázek 21: Ukázka strojů pro odstraňování dočasných podpěr a pryskyřic od společnosti PostProcess. [29]	37
Obrázek 22: Rozdíl po a před automatizovaným opracováním povrchu (podpěry, 5 min). [30].....	38
Obrázek 23: Možnost ventilace při FDM tisku. [31]	40
Obrázek 24: Řez zařízením Palette Mosaic 2. [32].....	43
Obrázek 25: Použití zařízení Palette Mosaic 2. [32].....	43
Obrázek 26: Testovací komora. [34].....	45
Obrázek 27: Testovaný vzorek. [34].....	46
Obrázek 28: 1. Tiskárna Original Prusa i3, MK3 S+; 2. tištěný model (mřížka); 3. počítadlo částic VPC 300. [36].....	49
Obrázek 29: Rozdělení počtu částic do jednotlivých kategorií. [36]	49
Obrázek 30: Graf závislosti počtu částic ve vzduchu (0,4 mm tryska).....	50
Obrázek 31: Graf závislosti počtu částic ve vzduchu (0,6 mm tryska).....	51
Obrázek 32: Graf závislosti počtu částic ve vzduchu (celý prostor učebny).	52
Obrázek 33: Ukázka zdravotně nezávadných modelů. [37]	54
Obrázek 34: Biologické pryskyřice na rostlinné bázi. [33].....	55
Obrázek 35: Zacházení s odpadem – toxické tekuté pryskyřice. [38].....	56
Obrázek 36: Optimální zorné podmínky pro práci na PC. [43].....	61
Obrázek 37: Správná poloha vsedě při práci na PC. [43]	62
Obrázek 38: Vyhovující pracovní pohyby. [43]	62

Obrázek 39: Výška pracovní roviny vestoje. [43]	63
Obrázek 40: Možnosti polohování kancelářské židle. [43]	64
Obrázek 41: Půdorys pracoviště FDM tisku.	66
Obrázek 42: 3D pohled na pracoviště FDM tisku.....	66
Obrázek 43: Místo pro postprocessing – pracoviště FDM tisku.....	67
Obrázek 44: Místo pro tisk – pracoviště FDM tisku.....	67
Obrázek 45: Místo pro tisk 2 – pracoviště FDM tisku.	67
Obrázek 46: Rozložení místností – pracoviště FDM tisku.	68
Obrázek 47: Oddělená kancelář – pracoviště FDM tisku.....	68
Obrázek 48: Oddělená kancelář (pohled 2) – pracoviště FDM tisku.	68
Obrázek 49: Půdorys pracoviště SLA tisku.....	69
Obrázek 50: 3D pohled na pracoviště SLA tisku.	70
Obrázek 51: Kancelář pracoviště SLA tisku.....	70
Obrázek 52: Kancelář pracoviště SLA tisku (pohled 2).	70
Obrázek 53: Místo pro tisk – pracoviště SLA tisku.	71
Obrázek 54: Místo pro postprocessing – pracoviště SLA tisku.	71
Obrázek 55: Oddělená místnost pro manipulaci s odpadem – pracoviště SLA tisku.	71
Obrázek 56: Oddělená místnost pro manipulaci s odpadem – pracoviště SLA tisku (pohled 2).....	72

Seznam tabulek

Tabulka 1: Naměřené a zprůměrované počty částic (0,4 mm tryska).....	50
Tabulka 2: Naměřené a zprůměrované počty částic (0,6 mm tryska).....	51
Tabulka 3: Naměřené a zprůměrované počty částic (celý prostor učebny).	52
Tabulka 4: Naměřené a zprůměrované počty částic (chodba a venku před fakultou).	53

Bibliografie

- [1] STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/downloads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [2] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection*. Vydání první. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-149-8783-750.
- [3] CHUA, Chee a Kah LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-401.
- [4] 3D tisk. In: *Plot Base* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.plotbase.cz/blog/3d-tisk>
- [5] *3D tisk: Jak funguje FDM/FFF tiskárna?* [online]. Redakce SHW: Článek, 2019 [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [6] FDM 3D printers. In: *Makers+* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.makersplus.eu/fdm-3d-printers/>
- [7] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Vydání první. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-802-5148-761.
- [8] Materiály pro tisk technologií SLA. In: *3D tisk online* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/materialy-sla/>
- [9] FDM. In: *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/fdm-3dtisk/>
- [10] Fused Deposition Modelling (FDM). In: *Matca* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/aditivni-technologie/fused-deposition-modelling/>
- [11] Co je to vlastně filament?. In: *3D Fox* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://foxclub.cz/co-je-to-vlastne-filament/>
- [12] 3D tisk - Volba materiálu a příprava podložky. In: *Inventorblok* [online]. Zbyněk Pohořelský, 2016 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-volba-materialu/>

- [13] Material Options for 3D Printing. In: *3D Pros* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.3d-pros.com/material-options>
- [14] Stereolithography (SLA) 3D printing: Technology overview. In: *Xometry* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://xometry.eu/en/stereolithography-sla-3d-printing-technology-overview/>
- [15] HLOUSEK, Petr. *3D printing: a prospective challenge for manufacturing: A manufacturing revolution*. Vydání první. Saarbrücken, Germany: AV AkademikerVerlag, 2015. ISBN 9783639865233.
- [16] Flexibilní a slévatelná pryskyřice pro 3D tiskárny. In: *CAD.cz* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/aktuality/77-aktuality/5629-flexibilni-a-slevatelna-pryskyrice-pro-3d-tiskarny.html>
- [17] Pro 3D tisk se používá i epoxidová pryskyřice. In: *Klapp* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.klapp.cz/pro-3d-tisk-se-pouziva-i-epoxidova-pryskyrice/>
- [18] WHY RESIN?. In: *Resina 3D world* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.resina3dworld.es/en/>
- [19] Stolní 3D tiskárna - jak vlastně funguje a kterou si vybrat. In: *3Dees* [online]. 2017 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/blog/3d-tiskarna-jak-vlastne-funguje-a-kerou-si-vybrat>
- [20] THE MAKERBOT REPLICATOR+. In: *MakerBot* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/3d-printers/replicator/>
- [21] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [22] Stratasys F370 3D Printer. In: *Plot IT* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.plot-it.co.uk/p/stratays_f370_3d_printer
- [23] Formlabs Form 3+. In: *3D Wiser* [online]. 2023 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/pryskyrice/formlabs/formlabs-form-3/>
- [24] NEO printers, stereolithography 3D printers. In: *Stratasys* [online]. 2023 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/stereolithography/neo-series-printers/>

- [25] Začínáme s 3D tiskem. In: *Premo* [online]. [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://www.premocz.eu/zaciname-s-3d-tiskem>
- [26] Ultimaker PVA. In: *3D Wiser* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/materialy/ultimaker-pva/>
- [27] Postprocessing 3D výtisků krok za krokem. In: *Josef Průša* [online]. David Schwarz, 2018 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/postprocessing-3d-vytisku-krok-za-krokem/>
- [28] Painter's Starting Guide. In: *Privateerpress* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://home.privateerpress.com/2022/11/29/painters-starting-guide/>
- [29] Post-processing - dodatečné úpravy výtisků. In: *3D Wiser* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/post-processing/>
- [30] Before-After. In: *Postprocess* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.postprocess.com/before-after/>
- [31] THE IMPORTANCE OF VENTILATION AND YOUR 3D PRINTING WORKSPACE. In: *3D printing Canada* [online]. 2018 [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: <https://3dprintingcanada.com/blogs/news/the-importance-of-ventilation-and-your-3d-printing-workspace>
- [32] Multimaterial 3D printing with mosaic palette 2. In: *3D Universe* [online]. 2019 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://3duniverse.org/2019/09/09/multimaterial-3d-printing-with-mosaic-palette-2/>
- [33] Pryskeřice na rostliné bázy. In: *Look in 3D* [online]. [cit. 2023-06-18]. Dostupné z: <https://www.lookin3d.cz/materialy/pryskyrice-na-rostline-bazy/>
- [34] AZIMI, Parham, Dan ZHAO, Claire POUZET, Neil CRAIN a Brent STEPHENS. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environmental Science and Technology* [online]. 2016, 50(3), 1260-1268 [cit. 2023-04-16]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.5b04983
- [35] How clean is the air in your manufacturing facility?. In: *The Fabricator* [online]. 2015 [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/safety/how-clean-is-the-air-in-your-manufacturing-facility->

- [36] *Video Particle Counter with built-in Camera Model VPC300 User Manual* [online]. 2014-2018 [cit. 2023-06-15]. Dostupné z: https://media.distrelec.com/Web/Downloads/_m/an/Extech-VPC300_eng_man.pdf
- [37] Jak tisknout zdravotně nezávadné 3D modely. In: *Prusa Research* [online]. Jakub Kočí, 2020 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/jak-tisknout-zdravotne-nezavadne-3d-modely_40666/
- [38] Is UV resin toxic? Risks and safety measures explained. In: *Wevolver* [online]. Benedict O'Neill, 2022 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/is-uv-resin-toxic-risks-and-safety-measures-explained>
- [39] Hygienické limity v pracovním prostředí – Obecná informace. In: *Státní zdravotní ústav* [online]. 2008 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://szu.cz/tema/pracovni-prostredi/hygienicke-limity-pro-pracovni-prostredi/hygienicke-limity-v-pracovnim-prostredi-obecna-informace/>
- [40] Vyhláška č. 6/2003 Sb. In: *Zákony pro lidi* [online]. 2003 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2003-6>
- [41] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. In: *Zákony pro lidi* [online]. 2007 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>
- [42] Ergonomie na pracovišti - definice a příklady z průmyslu. In: *Beewatec* [online]. 2023 [cit. 2023-06-22]. Dostupné z: <https://www.beewatec.com/cs/blog/ergonomie-na-pracovisti>
- [43] Ergonomie. In: *Znalostní systém prevence rizik v BOZP* [online]. [cit. 2023-06-29]. Dostupné z: <https://zsbozp.vubp.cz/ergonomie-pracovniho-mista>