



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VYHLAZOVACÍ BOX PRO 3D VÝTISKY FDM 3D TISKÁREN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Dubský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Bayer

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Jan Dubský

ID: 195659

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Vyhlazovací box pro 3D výtisky FDM 3D tiskáren

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku FDM 3D tisku se zaměřením na vlastnosti používaných filamentů a navrhnete box pro vyhlazování hotových výtisků z různých materiálů pomocí chemických par popřípadě aerosolu v závislosti na materiálu výtisku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 30.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Robert Bayer

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení, které by sloužilo k vyhlazování 3D výtisků z různých materiálů FDM 3D tiskáren. Vysvětluje princip 3D tisku a popisuje technologie, které jsou v 3D tisku využívány. V práci se nachází přehled užívaných tiskových materiálů a některých vybraných organických rozpouštědel. Popisuje metody vyhlazování v parách a vyhlazování aerosolem, které mohou být použity pro vyhlazování povrchu 3D výtisků. Metoda vyhlazování v parách byla experimentálně vyzkoušena pro rozpouštědla: aceton, dichlormethan, chloroform a tetrahydrofuran. Metoda vyhlazování aerosolem užívala roztoku acetonu a dichlormethanu v poměru 1:1. Obě metody byly testovány na vzorcích z materiálů PLA, ABS, PETG a SBS. Práce popisuje návrh vyhlazovacího zařízení na 3D výtisky s ohledem na chemickou kompatibilitu užitých konstrukčních materiálů a snadnou obsluhu zařízení.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, vyhlazování, výpary, aerosol, chemická kompatibilita

Abstract

This bachelor's thesis deals with a design of a device that would smooth out 3D prints, made of various materials, using FDM 3D printers. It explains the principle of 3D printing and describes technologies used in 3D printing. In this work is an overview of materials used for 3D printing and of some selected organic solvents. It describes methods of vapour smoothing and aerosol smoothing that can be used for smoothing out of 3D prints surface. The vapour smoothing method was experimentally tested using these solvents: acetone, dichloromethane, chloroform and tetrahydrofuran. The aerosol smoothing method used a solution of acetone and dichloromethane in the ratio of 1:1. Both methods were tested on samples made of PLA, ABS, PETG and SBS. This paper describes the design of a device for smoothing of 3D prints with regard to the chemical compatibility of used construction materials and ease of use of the device.

Keywords

3D printing, FDM, smoothing, vapour, aerosol, chemical compatibility

Bibliografická citace:

DUBSKÝ, Jan. *Vyhlazovací box pro 3D výtisky FDM 3D tiskáren* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119687>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Robert Bayer.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Robertu Bayerovi za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Veronice Richterové za poskytnutí konzultací v oblasti chemie.

V Brně dne 29. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	10
1. Teoretická část	11
1.1 Historie, princip a rozdělení 3D tiskáren	11
1.1.1 Fusion Deposition Modeling.....	12
1.1.2 Selective Laser Sintering.....	14
1.1.3 Stereolitografie	15
1.1.4 Direct Light Processing.....	16
1.2 Současný stav problematiky	18
1.3 Princip fungování navrhovaného zařízení	21
1.3.1 Způsob založený na tvorbě par	21
1.3.2 Způsob založený na tvorbě aerosolu	22
1.4 Přehled užívaných plastů	24
1.4.1 PLA	24
1.4.2 ABS	25
1.4.3 PETG.....	27
1.4.4 SBS.....	29
1.4.5 Ostatní plasty.....	30
1.5 Použitelná rozpouštědla	32
1.5.1 Aceton	33
1.5.2 Dichlormethan.....	34
1.5.3 Chloroform.....	35
1.5.4 Tetrahydrofuran.....	36
1.6 Chemická kompatibilita.....	37
2. Praktická část	40
2.1 Laboratorní experimenty.....	40
2.1.1 Chemické leptání povrchu vzorků parami chloroformu	42
2.1.2 Chemické leptání povrchu vzorků parami roztoku acetonu a DCM.....	44
2.1.3 Chemické leptání povrchu vzorků parami DCM	47
2.1.4 Chemické leptání povrchu vzorků parami acetonu a THF.....	49
2.1.5 Chemické leptání povrchu vzorků aerosolem roztoku acetonu a DCM	52
2.1.6 Test vlivu acetonu a DCM na epoxidový spoj	55
2.1.7 Zhodnocení výsledků laboratorních experimentů.....	57
2.2 Návrh zařízení.....	59
2.2.1 Mechanická část zařízení	59
2.2.2 Elektronická část zařízení	62
2.2.3 Softwarová část zařízení	63
3. Závěr	64

Literatura.....	66
Seznam příloh	72

Seznam zkratek

<i>FDM</i>	<i>Fusion Deposition Modeling</i>
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i>
<i>SLA</i>	<i>Stereolitografie</i>
<i>DLP</i>	<i>Direct Light Processing</i>
<i>SLM</i>	<i>Selective Laser Melting</i>
<i>DMLS</i>	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
<i>PLA</i>	<i>Kyselina polyléčná</i>
<i>ABS</i>	<i>Akrylonitrilbutadienstyren</i>
<i>PET</i>	<i>Polyethylentereftalát</i>
<i>PETG</i>	<i>Polyethylentereftalát-glykol</i>
<i>SBS</i>	<i>Styrenbutadienstyren</i>
<i>HD PLA</i>	<i>Teplotně odolná kyselina polyléčná</i>
<i>TPU</i>	<i>Termoplastický polyuretan</i>
<i>HIPS</i>	<i>Vysokonárazový polystyren</i>
<i>ASA</i>	<i>Akrylonitrilstyrenakrylát</i>
<i>PVA</i>	<i>Polyvinyl alkohol</i>
<i>PA</i>	<i>Polyamid</i>
<i>PC</i>	<i>Polykarbonát</i>
<i>PP</i>	<i>Polypropylen</i>
<i>PMMA</i>	<i>Polymethylmethakrylát</i>
<i>PEEK</i>	<i>Polyetherketon</i>
<i>DCM</i>	<i>Dichlormethan</i>
<i>THF</i>	<i>Tetrahydrofuran</i>
<i>CAS</i>	<i>Chemical Abstracts Service</i>
<i>IDLH</i>	<i>Immediately dangerous to life or health</i> <i>(překlad: Bezprostřední nebezpečí ohrožení života</i> <i>nebo zdraví)</i>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma technologie FDM	13
Obrázek 2 - Schéma technologie SLS	14
Obrázek 3 - Schéma technologie SLA.....	16
Obrázek 4 - Schéma technologie DLP.....	17
Obrázek 5 - Vizualizace tiskových vrstev	18
Obrázek 6 - Příklad povrchu vyhlazeného acetonovými parami	19
Obrázek 7 - Připravené vzorky 3D výtisků pro měření	41
Obrázek 8 - Vzorek z PLA po leptání v parách chloroformu	42
Obrázek 9 - Vzorek z ABS po leptání v parách chloroformu.....	43
Obrázek 10 - Vzorek z PETG po leptání v parách chloroformu.....	43
Obrázek 11 - Vzorek z SBS po leptání v parách chloroformu	44
Obrázek 12 - Vzorek z PLA po leptání v parách roztoku acetonu a DCM.....	45
Obrázek 13 - Vzorek z ABS po leptání v parách roztoku acetonu a DCM.....	45
Obrázek 14 - Vzorek z PETG po leptání v parách roztoku acetonu a DCM....	46
Obrázek 15 - Vzorek z SBS po leptání v parách roztoku acetonu a DCM.....	46
Obrázek 16 - Vzorek z PLA po leptání v parách DCM	47
Obrázek 17 - Vzorek z ABS po leptání v parách DCM.....	48
Obrázek 18 - Vzorek z PETG po leptání v parách DCM.....	48
Obrázek 19 - Vzorek z SBS po leptání v parách DCM	49
Obrázek 20 - Vzorek z PLA po leptání v parách THF	50
Obrázek 21 - Vzorek z PETG po leptání v parách THF	50
Obrázek 22 - Vzorek z ABS po leptání v parách acetonu	51
Obrázek 23 - Vzorek z SBS po leptání v parách acetonu.....	51
Obrázek 24 - Aerosol roztoku acetonu a DCM použitý při experimentu.....	52
Obrázek 25 - Vzorek z PLA po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM	53
Obrázek 26 - Vzorek z ABS po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM.....	53
Obrázek 27 - Vzorek z PETG po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM .	54
Obrázek 28 - Vzorek z SBS po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM.....	54
Obrázek 29 – Ukázka vzorku hliníku spojeného epoxidem.....	55
Obrázek 30 - Vzorek epoxidového spoje po vystavení acetonu	56
Obrázek 31 - Vzorek epoxidového spoje po vystavení DCM.....	56
Obrázek 32 - Umístění první zóny v navrhovaném zařízení	60
Obrázek 33 - Umístění druhé zóny v navrhovaném zařízení.....	61
Obrázek 34 - Umístění třetí zóny v navrhovaném zařízení	61
Obrázek 35 – Navrhované zařízení z různých pohledů.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti PLA	25
Tabulka 2 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti ABS	27
Tabulka 3 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti PETG	28
Tabulka 4 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti SBS	30
Tabulka 5 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností acetonu	33
Tabulka 6 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností DCM	34
Tabulka 7 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností chloroformu	35
Tabulka 8 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností THF	36
Tabulka 9 - Tabulka chemické rezistivity vybraných plastů vůči vybraným organickým rozpouštědlům	37
Tabulka 10 - Tabulka chemické kompatibility vybraných materiálů vůči vybraným organickým rozpouštědlům	38

ÚVOD

3D tisk je technologie, která ve srovnání se standardními způsoby výroby představuje velice rychlý způsob, jak převést digitální návrh na hmotný objekt. Její doménou už nejsou čistě průmyslové aplikace, kde byla užívána pro rapidní prototypování, ale stává se stále více užívanou i v hobby sektoru a domácnostech.

S technologií FDM 3D tisku, která bývá právě v hobby a domácím sektoru nejpoužívanější, je svázán problém ve formě zřetelných tiskových vrstev způsobených procesem nanášení jednotlivých vrstev při 3D tisku, které FDM 3D výtiskům dávají charakteristický vzhled.

Ačkoliv je možné viditelnost těchto vrstev omezit vhodným nastavením tiskárny před začátkem tisku, pro jejich úplné odstranění je nutné po dokončení výtisku užít některého z dalších procesů, které často vedou ke zhoršení některých parametrů výtisku, jako například rozměrové přesnosti, popřípadě je proces limitován pouze na malé množství používaných tiskových materiálů. Jedním takovým procesem je chemické vyhlazování povrchu výtisku leptáním parami acetonu, které je rychlé a nenáročné – a je-li správně provedeno, nezhorší kvalitu výtisku. Tento proces je však použitelný pouze pro zlomek používaných tiskových materiálů.

Z tohoto důvodu byla vytvořena tato práce, která má za úkol poskytnout vzhled do problematiky 3D tisku a technologií, které jsou pro 3D tisk užívány. Práce popisuje, jakými způsoby je možné upravit povrch výtisků pro eliminaci viditelnosti tiskových vrstev, se speciálním důrazem na chemické řešení ve formě vyhlazování povrchu výtisků leptáním.

V práci se nachází přehled používaných a dostupných tiskových materiálů s přehledem jejich fyzikálně-chemických vlastností a přehled některých dostupných rozpouštědel, které by bylo možné použít pro leptání povrchu 3D výtisků. Povaha takových rozpouštědel vytváří speciální nároky na zařízení určené k vyhlazování povrchu 3D výtisků. Zařízení musí být zkonstruováno z materiálů, které odolají dlouhodobému působení těchto rozpouštědel. V práci se proto nachází část zabývající se chemickou kompatibilitou některých běžných konstrukčních materiálů s uvažovanými rozpouštědly.

V práci jsou popsány provedené experimenty testující efekt chemických par a aerosolu vybraných rozpouštědel na vybrané tiskové materiály, z nichž byly zhotoveny testovací vzorky ve formě 3D výtisků. Práce obsahuje návrh mechanické, elektronické a softwarové části zařízení, které je snadné na konstrukci a obsluhu. Zařízení má za úkol vyhlazovat povrch 3D výtisků FDM 3D tiskáren z různých materiálů.

Základním předpokladem práce je aplikovatelnost metody chemického leptání v parách či aerosolu v navrhovaném zařízení, neboť metoda vyhlazování 3D výtisků v parách acetonu je již dobře zdokumentována a bývá dlouhodobě provozována jak v průmyslové výrobě, tak v domácích podmínkách.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Historie, princip a rozdělení 3D tiskáren

První zmínka o technologii 3D tisku se objevuje na počátku 80. let 20. století, kdy byla poprvé popsána Hideo Kodamou [1] [2]. Jím popsáný způsob 3D tisku se nazývá stereolitografie. Tento způsob 3D tisku byl dále rozvinut v roce 1984, kdy byl zadán požadavek na patent Charlesem Hullem [1] [3], který stojí za skutečným technickým návrhem, který využívají dnešní 3D tiskárny pracující na principu stereolitografie.

Další patent popisoval technologii Fusion Deposition Modeling, která v dnešní době představuje nejdostupnější technologii 3D tisku. Tento patent byl podán roku 1989 Scottem Crumpem [1] [4].

V roce 1990 byl předložen další patent, tentokrát Carlem Deckardem [1] [5], který popisuje technologii Selective Laser Sintering, mající největší uplatnění v průmyslovém sektoru. Pod tuto technologii se řadí i další technologie, například Selective Laser Melting nebo Direct Metal Laser Sintering, které jsou schopny tisknout kovové výtisky [6].

Další dobře dostupnou technologií je Direct Light Processing, jež je velice podobná stereolitografii [7].

Velký rozmach v oblasti 3D tisku nastal po roce 2000, kdy začaly končit dvacetileté platnosti patentů, což umožnilo vznik projektů, které se pokoušely vytvořit dostupnější 3D tiskárny [8].

Technologie 3D tisku je založena na základních pravidlech. Po návrhu požadovaného virtuálního objektu, který má být vytisknut, je tento objekt převeden na sérii instrukcí, které na základě zvolené technologie 3D tisku povedou k vytvoření reálného 3D objektu. Při procesu tvorby těchto instrukcí je virtuální objekt „nařezán“ na jednotlivé vrstvy o takové velikosti, kterou užitá technologie podporuje (od desítek μm po desítky mm). Následně vytvoří sérii instrukcí pro každou takto vytvořenou vrstvu. 3D tiskárny využívají dvou procesů, buď materiál taví (v případě plastu či kovu), nebo jej vytvrzují (v případě fotocitlivé pryskyřice). Vzhledem k tomu, že 3D tiskárna je číslicově řízený stroj, může být řízena právě sérií dříve vytvořených instrukcí, které popisují, kdy a co má 3D tiskárna provést za akci. Jedná se tedy o aditivní proces, kdy je digitální objekt vytvářen jednu vrstvu po druhé, dokud není vytvořen reálný 3D objekt, který může být mnohokrát vytvořen znovu – a pro jeho modifikaci je nutné jej pouze upravit v návrhovém programu a znovu vytisknout.

Právě tato schopnost 3D tiskáren je důvodem, proč je technologie 3D tisku natolik významná. Umožňuje totiž velmi rychle vytvářet prototypy designů, které mohou být okamžitě testovány – a tedy i upravovány a vylepšovány, s minimálními náklady na úpravu jednotlivých verzí designu.

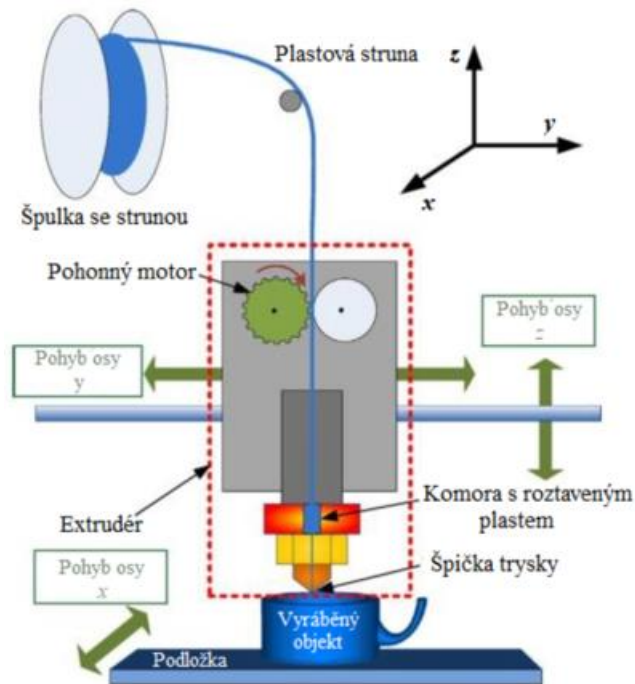
Zároveň s pokroky v oblasti 3D tiskáren, jejich tiskových materiálů a zvyšující se dostupností 3D tiskáren se nachází stále větší množství jejich uplatnění [9]. Od rapidního

prototypování se 3D tisk začíná posouvat do oblastí jako je stavebnictví, medicína či rapidní výroba, kdy se využívá velkého množství 3D tiskáren pracujících současně, a vytisknutý produkt již není pouhým prototypem, ale finálním produktem určeným k prodeji. Další aplikace nachází například ve vesmírných aplikacích, od tisku drobných zařízení na vesmírné stanici po tisk komponent pro rakety [10].

V následujících kapitolách budou představeny technologie užívané pro 3D tisk. Technologií existuje větší množství, avšak ve většině případů jde o modifikaci jedné z níže představených technologií.

1.1.1 Fusion Deposition Modeling

Fusion Deposition Modeling (dále jen FDM) je technologie, která byla prvně popsána Scottem Crumpem. Představuje jednu z nejvíce rozšířených technologií 3D tisku, protože je nejjednodušší na mechanické provedení. Princip technologie spočívá v tavení plastové struny (nazývané filament), která je tlačena do trysky tiskárny. Tryska tiskárny je zahřívána do bodu, kdy dojde k přetavení tiskové struny. Vzhledem k tomu, že je struna posouvána motorem do trysky, je na roztavený plast v trysce vyvíjen tlak, který způsobuje odtékání plastu ven z trysky. Po kontaktu s okolním prostředím začne roztavený plast rychle tuhnout, což vede k vytvoření pevné plastové struktury. Celá tryska je upevněna na takové konstrukci, která umožňuje její pohyb v libovolném směru ve všech třech osách. Pro samotný tisk je tedy pohyb trysky precizně ovládán tak, aby se pohybovala po ploše, v níž se má výsledný výtisk nacházet. Právě aplikací vhodného tlaku na roztavený plast v trysce se ovládá, kam bude plast nanášen a v jaké rychlosti či objemu. V prvním kroku se tedy začne nanášet vrstva plastu přímo na desku, která slouží jako podkladový materiál pro výtisk. Po dokončení nanášení jedné vrstvy se přestane vsouvat struna do trysky, čímž poleví tlak na roztavený plast v trysce a přestane docházet k vytékání plastu ven z trysky. Tryska se následně posune nahoru o velikost jedné vrstvy (popř. se sníží výška podkladové desky), čímž je vytvořen prostor pro nanesení další vrstvy. Tryska totiž vždy musí být lehce nad plochou, na níž má být plast vytlačován, jinak nedojde k vytlačení požadovaného objemu plastu potřebného pro přesnou tvorbu výtisku. Poté se opět zvýší tlak na roztavený plast v trysce posunutím tiskové struny dále do trysky, čímž dojde k dalšímu vytlačování materiálu. Tento roztavený plast je v době ulpění na předchozí natisknuté vrstvě stále dost horký na to, aby natavil plochu předchozí vrstvy přímo pod sebou a tím došlo k vytvoření spoje mezi těmito dvěma vrstvami. Tento proces se poté opakuje, dokud není výtisk hotov. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma technologie FDM.



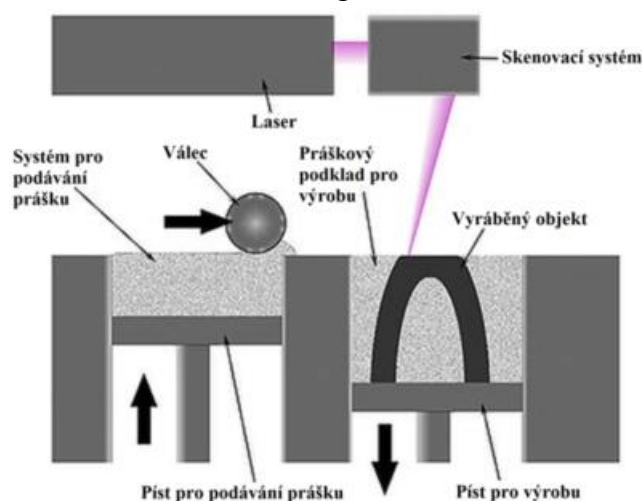
Obrázek 1 - Schéma technologie FDM [11]

Zdaleka největší výhodou této technologie je její dostupnost. Celou tiskárnu je možné postavit s nízkým rozpočtem v domácích podmínkách, provoz není náročný, užívané filamenty nejsou drahé. Tiskárny zpravidla nezabírají mnoho místa, jakákoliv závada je lehce opravitelná a výtisky nabízejí dostačující mechanickou pevnost pro většinu domácích využití.

Největší slabinou této technologie je však její nízké rozlišení a dlouhá doba tisku. Vzhledem k vysoké hmotnosti tiskové hlavy, v níž dochází k natavování plastu, stejně jako k velkému množství pohyblivých částí, je tiskárna velice náchylná na vibrace. Pohyb těžké tiskové hlavy zanechává na výtiscích při vyšších rychlostech tisku artefakty, musí být tedy použita nižší rychlost tisku. Doba tisku je extrémně závislá na nastavené výšce vrstvy a všech třech rozměrech výtisku. A i v případě nastavení velmi nízké výšky vrstvy (např. 0,1 mm), což má za následek extrémně dlouhou dobu tisku i relativně malých objektů, je možné na finálním výtisku sledovat jednotlivé tiskové vrstvy, což má negativní vliv na celkový estetický dojem z výtisku.

1.1.2 Selective Laser Sintering

Technologie Selective Laser Sintering (dále jen SLS), popsaná Carlem Deckardem, využívá pro tvorbu 3D objektu principu založeného na spékání tenké vrstvy plastových částic laserem. Na desce, sloužící jako podkladový materiál nesoucí samotný výtisk, se vytvoří rovnoměrná tenká vrstva plastového prášku. Tato vrstva je zpravidla vytvořena válcem, který před sebou tlačí plastový prášek ze zásobníku. Předem definovaná plocha této tenké vrstvy je poté zahřívána laserovým paprskem, až do chvíle, kdy dojde k roztavení plastového prášku. Po vychladnutí takto vytvořené vrstvy je deska posunuta níže o vzdálenost, která je rovna velikosti vytvořené vrstvy. Následně je možné na dříve vytvořenou vrstvu válcem nanést další tenkou vrstvu plastového prášku – a následně jej opět zahřát laserem k jeho natavení. Tímto dojde ke spojení plastových částic mezi sebou do další vrstvy, stejně jako ke spojení nově vytvořené vrstvy s předchozí vrstvou. Proces se poté opět opakuje. Po drobné úpravě technologie je dokonce možné tímto způsobem nahradit plastový prášek práškem kovovým – a produkovat tímto způsobem kovové výtisky. Tato technologie, která je schopná 3D tisku kovových výtisků, se označuje jako Selective Laser Melting (SLM), popř. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [6]. Na obrázku níže je znázorněno schéma technologie SLS.



Obrázek 2 - Schéma technologie SLS [12]

Výhodou této technologie je především její vysoké rozlišení z důvodu využití laserového paprsku. Zároveň užití laseru jako zdroje tepla pro natavování jednotlivých vrstev umožňuje použití velmi náročných materiálů na tisk, jako například kovu. Z důvodu možnosti užití lepších tiskových materiálů je technologie SLS vhodná pro produkci výtisků, které mají být silně mechanicky namáhány.

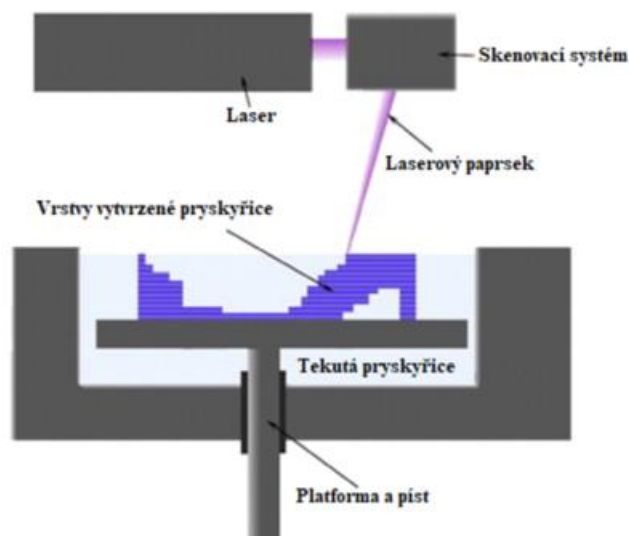
Nevýhodou technologie je pak její náročnost. Vzhledem k požadavku vytvoření homogenní tenké vrstvy plastových částic musí být zařízení velice precizní, navíc laser musí být dostatečně výkonný, což se vše projeví na ceně produktu. Zároveň práce s jemným práškem, který technologie ke své funkci vyžaduje, zvyšuje nároky na okolí, neboť může dojít ke snadnému znečištění okolních prostor. Obzvláště při vyjímání výtisků z pracovní

oblasti tiskárny je nutné odstranit veškerý nevyužitý prášek, na což je zpravidla využíváno další zařízení. Používaný prášek navíc musí být vysoké kvality, pouze s minimální deviací od předepsané velikosti jednotlivých částic, což se projevuje na jeho ceně.

1.1.3 Stereolitografie

Jak již bylo dříve řečeno, princip stereolitografie (dále jen SLA) byl popsán Hideo Kodamou. Ve svých pracích popsal způsob, kterým je možné vytvořit 3D objekt vytvrzováním fotocitlivé pryskyřice, která reaguje na ultrafialové záření. Po dopadu tohoto záření na povrch monomerů, ze kterých se pryskyřice skládá, se začnou monomery spojovat do polymerů, což se z makroskopického pohledu projeví jako vytvrzení. Tloušťka vytvrzené vrstvy je závislá na intenzitě dopadajícího záření, ploše exponované oblasti a času, po který záření na povrch dopadá [2]. Pokud tedy bude exponována pouze předem vybraná oblast fotocitlivé pryskyřice, dojde k jejímu vytvrzení v malé lokalitě vymezené paprskem, zatímco zbytek pryskyřice v zásobníku tiskárny si zachová své původní vlastnosti (tedy tekutost). Pro tvorbu reálného 3D objektu je potřeba exponovat různé plochy fotocitlivé pryskyřice v přesném pořadí tak, aby byl výsledkem vytvrzený objekt.

Co se samotné funkce tiskárny týče, zpravidla je řešena nádobou, která je naplněna zmíněnou fotocitlivou pryskyřicí. V nádobě se nachází pohyblivá deska sloužící jako podkladový materiál, na němž dochází k tisku a který finální výtisk nese. Nad nádobou se nachází optická soustava skládající se ze zdroje ultrafialového záření a zrcadel [3]. Tato soustava je následně softwarově řízena tak, aby exponovala specifikovanou část vytvářeného objektu, čímž dojde k vytvrzení pryskyřice na povrchu desky. Následně je deska posunuta, aby mohla být nově vytvořená vrstva pokryta další vrstvou pryskyřice. Poté se deska vrátí na pozici, která je vzdálena od původní pozice o velikost tloušťky jedné vrstvy, aby mohlo dojít k nanesení další vrstvy. Ta je nanášena stejným mechanismem jako vrstva předchozí, čímž zároveň dojde k vytvoření spoje mezi oběma vrstvami. Proces se pak znovu opakuje. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma technologie SLA.



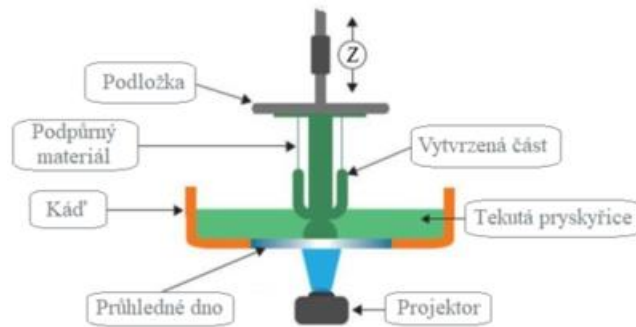
Obrázek 3 - Schéma technologie SLA [13]

Výhody této technologie, jako v případě SLS, souvisejí s užitím laseru jako zdroje ultrafialového záření pro vytvrzování fotocitlivé pryskyřice, což má za následek velmi vysoké rozlišení technologie.

Nevýhody jsou podobné jako v případě SLS technologie, tedy požadavek vysoké preciznosti celé tiskárny, což zvyšuje její cenu. Zároveň i fotocitlivá pryskyřice je v porovnání s tiskovou strunou užívanou v FDM technologii výrazně dražší. Další nevýhodou je nutnost očišťovat výtisky od zbytků pryskyřice, což se nejčastěji dělá omytím výtisku v dalších chemikáliích (například v izopropylalkoholu). Zároveň co se samotných výtisků týče, bývají zpravidla křehčí než výtisky z klasických plastů. Výtisky z SLA 3D tiskáren proto nacházejí horší uplatnění v prostředích, kde je po výtiscích požadována mechanická odolnost.

1.1.4 Direct Light Processing

Direct Light Processing (dále jen DLP) je technologie, která využívá ke své funkci téměř stejného principu, jako technologie SLA. Opět obsahuje fotocitlivou pryskyřici, která je vytvrzována ultrafialovým zářením, popř. ve speciálních případech i zářením ve viditelné oblasti spektra. Pryskyřice se nachází v nádobce, pod níž je umístěn projektor. Do nádoby se ponoří deska, která slouží jako podpurný materiál pro výtisk. Po ustálení pryskyřice mezi dnem nádoby a deskou se na projektoru promítne motiv, jenž vytvrdí exponovanou pryskyřici. Deska se následně nadzvedne, aby mohlo dojít k natečení další pryskyřice do míst, kde má být vyvolána další vrstva. Poté se deska opět přiblíží ke dnu, nyní však pouze o takový kus, aby příští vytvrzená vrstva spočívala na předchozí vrstvě. Na projektoru se opět promítne motiv a proces se opakuje. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma technologie DLP.



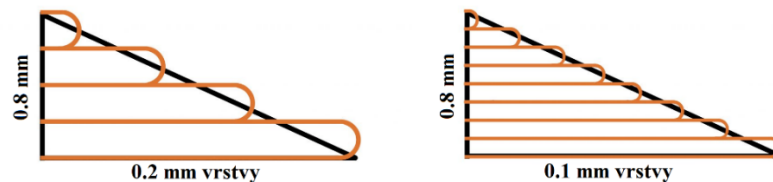
Obrázek 4 - Schéma technologie DLP [14]

Hlavní výhoda této technologie spočívá v tom, že se může exponovat celá tisková plocha najednou. Jediným parametrem ovlivňující dobu tisku je hloubka výtisku. Další výhodou, alespoň v porovnání s FDM technologií, je mnohem vyšší rozlišení.

Nevýhody opět spočívají v požadavku na relativní preciznost tiskárny, avšak celková komplexnost tiskárny je nižší než v případě užití SLA či SLS technologie, neboť není nutné řešit složitou laserovou optiku. Užíváním projektoru namísto laserového paprsku však zároveň klesá rozlišení v porovnání s technologií SLA, na výtiscích jsou patrné hrany [7], které jsou způsobeny tvarem jednotlivých pixelů použitého projektoru. Zároveň je stále nutné výtisk očistit od zbývající pryskyřice jako v případě výtisků SLA.

1.2 Současný stav problematiky

V současné době se používá několik metod pro vyhlazování povrchu výtisků FDM 3D tiskáren. Vyhlazování povrchů může být důležité nejen z estetických důvodů, ale může být i nezbytné pro plnění požadované funkce výtisku (např. pokud výtisk slouží jako ložisko či má být vodotěsný), popřípadě může navýšit pevnost výtisku v ose, v níž docházelo k nanášení jednotlivých vrstev. Pro usnadnění finálního opracování výtisku se pro výtisk zpravidla používá co nejnižší výška vrstvy, které je tiskárna schopna dosáhnout. Tím je docíleno co nejhladšího povrchu výtisku ještě před započítím dalších procedur vyhlazujících povrch výtisku. Na obrázku níže jsou vizualizovány jednotlivé tiskové vrstvy pro výšku vrstvy 0,2 mm (vlevo) a 0,1 mm (vpravo). Z obrázku je patrné, že užitím nižší výšky vrstvy dojde k vytvoření hladšího povrchu, avšak tiskové vrstvy budou vždy přítomné.



Obrázek 5 - Vizualizace tiskových vrstev [15]

Po dokončení výtisku se může začít s úpravou jeho povrchu. Zvolená úprava povrchu je silně závislá na užitém tiskovém materiálu. Například v případě flexibilních materiálů, jako je termoplastický polyuretan, avšak i u množství dalších materiálů, se dá využít opětovného přetavení povrchu výtisku. Výtisk se nahřívá například horkovzdušnou pistolí, dokud nedojde k natavení povrchu výtisku, jenž se zcela spojí dohromady a zamaskuje stopy po tiskových vrstvách. Celý povrch by měl být po použití tohoto procesu lesklý. Problémem této metody je nerovnoměrné rozložení tepla a proudění vzduchu na povrchu výtisku. Tím může v některých místech výtisku dojít ke ztrátě modelové geometrie vlivem zahřátí plastu nad jeho teplotu skelného přechodu, což vede k tomu, že plast začne být tvárný. Protože ale teplota skelného přechodu bývá nižší než teplota tání, povrch výtisku nemusí být vždy dostatečně natavený na to, aby mohlo dojít k zahřazení vnějšího povrchu ještě před tím, než začne objekt měknout. Dále může být obtížné zahřívát špatně přístupné části výtisku či drobné detaily. Navíc vlivem proudění vzduchu může dojít k posunu nataveného povrchového materiálu.

Dalším způsobem, který lze užít pro vyhlazení povrchu výtisku, je broušení. Výtisk se brousí pilníky a brusnými papíry o různé hrubosti, čímž je odebrán přebytečný materiál, který tvoří nerovnosti na povrchu výtisku. Tato metoda může být využita prakticky u všech používaných materiálů. Výsledkem je velice hladký povrch výtisku, avšak takový povrch často vypadá jinak než původní povrch výtisku, obzvláště u filamentů obsahujících pigmenty dochází ke změně barvy. Finální výtisk pak bývá bez dalších úprav povrchu matný. Navíc může dojít k narušení geometrie výtisku, neboť nelze

odhadnout, kolik materiálu bude nutné odebrat. Další nevýhodou je obtížnost aplikace procesu na špatně přístupných místech výtisku či na křehkých částech výtisk.

Opakem vyhlazení povrchu odebíráním materiálu v případě broušení je naopak nanášení jiného materiálu, který drobné mezery mezi vrstvami vyplní. K tomuto se využívá buď epoxidu, který je v tenké vrstvě nanesen na povrch výtisku, nebo základové barvy, která je nastříkána či natřena na výtisk, který může být následně dále barven. Tímto procesem je možné dosáhnout dobrého zahlazení všech nerovností na povrchu – a případný přebytečný materiál je možné zbrousit. Avšak problémem je nutnost aplikace optimálního množství materiálu. V případě užití příliš nízkého množství budou vrstvy na výtisku stále patrné, v případě příliš velkého množství může materiál začít formovat další nerovnosti na povrchu. Dále vždy dojde k navýšení tloušťky stěn, tudíž tolerance výtisku budou pozměněny. Navíc opět nastává problém s použitím procesu na špatně přístupných částech výtisku. V případě malých detailů na výtisku pak může dojít k jejich úplné ztrátě vlivem jejich úplného zamaskování vrstvou nově nanášeného materiálu. Povrch takto upraveného výtisku může být matný i lesklý v závislosti na užitém nanášeném materiálu.

Posledním často užívaným procesem úpravy povrchu výtisku bývá vyhlazování v parách acetonu. Tento proces lze použít pouze na materiálech, které jsou v acetonu rozpustné, nejčastěji tedy bývají tímto procesem vyhlazovány výtisky zhotovené z ABS. Aceton je využíván kvůli jeho snadné dostupnosti a kvůli jeho těkavosti. K jeho vypařování dochází již při pokojové teplotě. Pro užití tohoto procesu stačí uzavřít výtisk do nádoby, na jejímž dně je malé množství acetonu. Pro vyšší efektivitu procesu je možné do nádoby přidat ventilátor, který zajistí cirkulaci vzduchu. Výtisk se poté nechá po určitou dobu v této acetonové atmosféře. Aceton reaguje s povrchem výtisku, čímž jej rozpouští [16] a po jeho odpaření umožňuje vznik nových vazeb v rámci výtisku. Proto je nutné výtisk vyjmutí z acetonových par vysušit [17], neboť povrch výtisku je vlivem přítomnosti zbytkového acetonu velice tvárný. Po jeho odpaření je výtisk opět pevný – a při správné aplikaci procesu má hladký a lesklý povrch bez známek tiskových vrstev (viz. obrázek 6).



Obrázek 6 - Příklad povrchu vyhlazeného acetonovými parami [18]

Při správném provedení navíc nedochází k téměř žádné ztrátě geometrie výtisku [19]. Při zajištění dobré cirkulace vzduchu, či při dostatečném nasycení prostoru parami, dochází k leptání i těžko přístupných míst. Zásadní nevýhodou používání acetonových výparů je nepoužitelnost této metody u plastů, které nejsou v acetonu rozpustné.

Leptání výtisků v parách acetonu využívá i jedno ze současných komerčních zařízení určených k vyhlazování výtisků 3D tiskáren. Jedná se o Finishing Touch Smoothing Station vyvinutý firmou Stratasys. V tomto zařízení se využívá kondenzování par acetonu na povrchu výtisků z ABS. Výtisk je nejprve zavěšen do sušicí zóny zařízení, která je chlazená na teplotu okolo 10 °C [16]. Zde se ponechá po několik desítek minut, aby došlo k ochlazení výtisku na tuto teplotu. Následně se výtisk vloží po dobu několika desítek sekund do acetonových par, které jsou vytvářeny jeho zahříváním. Rozdíl v teplotě par acetonu a výtisku způsobí kondenzaci acetonu na povrchu výtisku. Výtisk je po uplynutí potřebné doby z leptací části zařízení vyjmut a uložen zpět do sušicí zóny, kde opět dochází k jeho chlazení. Po odpaření zbytku acetonu je proces dokončen. V případě nedostačujícího výsledku lze proces několikrát opakovat [20]. Nevýhodou tohoto zařízení je jeho velikost, stejně jako že dokáže vyhlazovat pouze výtisky z ABS.

Dalším komerčním produktem na vyhlazování výtisků je Polysher od firmy Polymaker. Jedná se o zařízení, které je schopné vyhlazovat povrchy výtisků z materiálu, který výrobce nazývá PolySmooth. Jedná se o polyvinylbutyral, který je rozpustný v alkoholech [21]. Proto se v zařízení používá izopropylalkohol či ethanol jako rozpouštědlo umístěné v zásobníku zařízení. Po vložení výtisku do leptací komory zařízení a jeho zapnutí je rozpouštědlo přiváděno na rychle vibrující perforovanou membránu, která z rozpouštědla vytváří aerosol. Ten je následně veden do leptací komory zařízení. Aerosol ulpívá na povrchu výtisku a naleptává jej po dobu několika desítek minut [22]. Po ukončení činnosti zařízení se výtisk nechá oschnout. Po odpaření veškerého rozpouštědla je povrch výtisku hladký a lesklý, bez pozměnění geometrie výtisku [23]. Hlavní nevýhodou tohoto zařízení je jeho nepoužitelnost na jakýkoliv jiný materiál kromě polyvinylbutyralu, což je materiál, který v oblasti hobby 3D tisku není příliš rozšířený, především kvůli jeho vysoké ceně.

Další způsoby, které je možné užít pro vylepšení vzhledu a vlastností výtisků, zahrnují například galvanické pokovení, kdy se výtisk pokryje vodivou vrstvou, která je poté pokovena, nebo obrušování a leštění výtisku v rotačním válci, který je naplněn drobnějšími částicemi, zajišťující opracování výtisku. Tato řešení jsou ale zpravidla náročnější na technické vybavení, či nákladné na pořízení a údržbu. Proto nacházejí uplatnění spíše v průmyslu.

1.3 Princip fungování navrhovaného zařízení

Navrhované zařízení musí pro svou funkci obsahovat několik částí. Bude se jednat o následující části: zónu se zásobníkem pracovních chemikálií, zónu pro leptání výtisku, zónu se zásobníkem na odpadní chemikálie a část obsahující řídicí elektroniku. Konkrétní uspořádání zařízení bude záviset na způsobu rozptylování chemikálií do zóny pro leptání výtisku. Tyto způsoby jsou popsány v následujících podkapitolách.

1.3.1 Způsob založený na tvorbě par

Tento způsob využívá procesu odpařování pracovních chemikálií vlivem teploty. Chemikálie budou zaváděny v kapalném skupenství do leptací zóny zařízení, kde bude docházet k jejich odpařování. K odpařování může docházet samovolně vlivem teploty okolního prostředí, nebo může být urychleno vyhříváním bazénky, do níž by byla chemikálie přiváděna. Toto řešení je jednoduché na provedení. Riziko spojené s tímto způsobem odpařování spočívá v kontaktu elektricky zahříváné bazénky a silně hořlavých pracovních chemikálií. Pakliže by teplota bazénky byla špatně řízena, či by došlo k poruše zařízení, mohlo by dojít ke vzplanutí zařízení.

Předností tohoto způsobu je tedy jeho snadné použití. Zároveň je tento způsob již léta využíván v jiných komerčních zařízeních, kde byla dokázána jeho funkčnost [16] [19].

Nevýhodou této metody je pak nutnost vytvořit systém, který by zajišťoval dostatečnou cirkulaci vzduchu v rámci leptací zóny. Zároveň bez užití zahříváné bazénky s chemikálií by nasycení prostoru leptací zóny parami trvalo za normálních podmínek velice dlouhou dobu. To by mohlo způsobovat nerovnoměrné rozmístění chemikálie v leptací zóně, a tedy i nerovnoměrné leptání povrchu výtisku. Zahříváním bazénky by se pak zvyšovalo již zmíněné riziko vzplanutí chemikálie. Zároveň po ukončení činnosti zařízení by vyčištění prostoru od chemických par vyžadovalo další části zařízení, které by celé zařízení komplikovaly.

Zařízení využívající tohoto způsobu by obsahovalo zásobník s pracovní chemikálií. Chemikálie by byla peristaltickým čerpadlem vedena do bazénky umístěné v leptací zóně zařízení. Tato bazénka by byla zhotovena z tepelně vodivého materiálu, který by umožňoval její zahřívání elektrickými topnými tělesy umístěnými vně bazénky. Působením tepla by docházelo k odpařování chemikálie, leptací zóna, v níž by byl umístěn vyhlazovaný výtisk, by tedy byla vyplněna parami pracovní chemikálie. Z tohoto důvodu by v případě činnosti zařízení musela být celá leptací zóna oddělena od ostatních částí zařízení, stejně jako od okolního prostředí. To by bylo zajištěno hermetickým uzávěrem ve formě víka na vrchní straně zařízení. Toto víko by zároveň umožňovalo přístup do leptací zóny v době, kdy zařízení není v činnosti, aby do něj mohl být vložen vyhlazovaný výtisk. Reakcí mezi parami chemikálie a povrchem výtisku by docházelo k naleptání povrchu materiálu [17]. V leptací zóně by se zároveň nacházely ventilátory, které by zajišťovaly pohyb vzduchu nasyceného parami. Dále by se zde nacházel otvor

pro vývod par, který by byl za normálních okolností uzavřen. Po ukončení činnosti zařízení by však došlo k jeho otevření a následné ventilaci par pryč z leptací zóny za užití dalšího ventilátoru. Tyto páry by musely být vyváděny do chemické digestoře – a to buď hadicí, nebo tak, že by samotné zařízení bylo po ukončení činnosti do této digestoře umístěno. Zároveň v bazénce umístěné v leptací zóně by byl přítomen solenoidový ventil pro odvod odpadních chemikálií. Po otevření tohoto ventilu by došlo k odtěžení neodpařené chemikálie do zásobníku odpadních chemikálií, aby bylo zajištěno, že nebude docházet k odpařování nevyužité chemikálie.

Elektronická část zařízení by poté sestávala ze spínaného zdroje napětí napájejícího řídicí elektroniku, topná tělesa, ventilátory a peristaltické čerpadlo. Řídicí elektronika by na základě vstupu od uživatele ovládala peristaltické čerpadlo zodpovědné za odtok chemikálie ze zásobníku do bazénky, výkon ventilátorů v leptací zóně, elektrické vyhřívání bazénky topnými tělesy na základě monitorování její teploty, solenoidový ventil pro odvod odpadních chemikálií, a nakonec mechanismus odvodu chemických par z leptací zóny do chemické digestoře.

1.3.2 Způsob založený na tvorbě aerosolu

Další způsob využívá namísto par aerosolu. Tento aerosol by byl vytvářen piezoelektrickým měničem. Jedná se o modul, které sestává z piezoelektrické keramiky a kovové fólie, která je zhotovena například z nerezové oceli 304 [24]. Na takto vytvořený disk se pak přivádí řídicí elektronický signál, který způsobuje mechanické vibrace tohoto disku [25]. V závislosti na aplikaci se užívá různých frekvencí, například pro využití piezoelektrického měniče ve formě generátoru vodní mlhy se pak používá frekvence od stovek kHz [24] po jednotky MHz [26]. Pro vytvoření aerosolu v navrhovaném zařízení by byl použit právě piezoelektrický měnič původně určený k tvorbě vodní mlhy. Princip funkce takového generátoru mlhy spočívá v tom, že se na piezoelektrický disk přivádí voda. Pakliže by voda nebyla na disku přítomna při jeho buzení elektrickým signálem, mohlo by dojít k poškození disku [26]. Disk je buzen frekvencí nacházející se ve výše zmíněném rozsahu, která odpovídá rezonanční frekvenci použitého disku. Disk mění své prohnutí na základě vstupního elektrického signálu. Voda se snaží přizpůsobit tvaru disku, nicméně vzhledem k rychlosti kmitání disku toho není schopna. Tím dochází k vytvoření oblasti nízkého tlaku nad diskem po dobu konvexního prohnutí disku. Po tuto dobu dochází k tvorbě malých vzduchových kapes přímo nad diskem. Následně při konkávním prohnutí disku dojde k vytvoření vlny o vysokém tlaku, která vytlačí vytvořené kapsy vzduchu na povrch vody [27]. Tím dojde k vytvoření velice jemné mlhy, kterou je možné dobře absorbovat do vzdušného proudění [28]. Pro úspěšné užití tohoto generátoru aerosolu v navrhovaném zařízení však musí být pravdivý předpoklad, že vzhledem k podobným fyzikálním vlastnostem používaných rozpouštědel a vody bude takovýto piezoelektrický měnič fungovat jako generátor aerosolu i pro vybraná

rozpouštědla. Požadavkem na takový měnič v této aplikaci by pak byla nejen jeho reálná funkčnost pro tato rozpouštědla, ale zejména jeho chemická odolnost vůči nim.

V případě užití takového ultrazvukového piezoelektrického měniče jako zdroje aerosolu by zařízení sestávalo z mírně odlišných částí než v případě užití způsobu založeného na tvorbě par. Vzhledem k tomu, že se u měniče předpokládá omezená životnost v agresivním prostředí pracovních chemikálií, by musel být celý modul snadno vyměnitelný. Byl by umístěn v drobné bazénce na chemikálii v zásobní části umístěné nad leptací zónou zařízení. Pracovní chemikálie by se před začátkem činnosti zařízení nalila do této bazénky. Po zapnutí zařízení by byla následně přeměňována na aerosol o velikosti částic v jednotkách μm v závislosti na užitém měniči [24] [26]. Takto vytvořený aerosol by byl gravitací naveden do leptací zóny zařízení, kde by se opět nacházel vyhlazovaný výtisk. Jedna stěna leptací zóny by sestávala z dvířek, kterými by bylo možné vložit výtisk do zařízení. Leptací zóna by dále obsahovala perforované dno, které by umožňovalo odtok kondenzujícího aerosolu do zásobníku na odpadní chemikálie pod ním. Tato kondenzace by po dokončení leptání mohla být urychlena přidáním ventilátorů do zařízení. Ovládáním jejich rychlosti při činnosti zařízení by zároveň mohla být zajištěna lepší distribuce aerosolu po leptací zóně zařízení. Proces leptání aerosolem by měl být agresivnější než proces leptání parami, neboť je k dispozici větší množství chemikálie v leptací zóně zařízení na jednotku objemu než v případě par. Navíc lze snáze kontrolovat, kolik chemikálie bude použito, neboť každý piezoelektrický měnič má specifikované množství kapaliny, které přemění na aerosol za daný čas [24] [26].

Elektronická část zařízení by ovládala na základě uživatelského vstupu piezoelektrický měnič a rychlost ventilátorů.

Výhody tohoto způsobu řešení by spočívaly v možnosti lepší kontroly nad leptacím procesem, stejně jako ve větší uzavřenosti systému, neboť by nebylo třeba jej užívat převážně v chemické digestoři. Zároveň vlivem většího množství uvolněného rozpouštědla za kratší čas – a celkově většího množství rozptýleného rozpouštědla uvnitř leptací zóny – by mělo dojít ke značnému snížení času nutného k vyhlazení výtisku.

Nevýhoda tohoto způsobu spočívá především v možnosti kontaktu chemikálie s elektřinou, v případě, že by došlo k poškození piezoelektrického disku. Zároveň piezoelektrický disk při své operaci generuje malé teplo vlivem ztrátového výkonu, což opět zvyšuje nebezpečí při práci s vysoce hořlavými látkami.

1.4 Přehled užívaných plastů

Pro FDM 3D tisk se v dnešní době využívá velké množství různých plastů. Z principu funkce FDM tiskáren je nutné, aby každý používaný materiál, z něhož se zhotovují výtisky, byl termoplastem. Tato vlastnost zajišťuje, že po tom, co je plast při výrobě tepelně zpracován pro tvorbu tiskové struny, bude tuto strunu možné opět přetavit v trysce tiskárny a vytvořit z ní 3D výtisk. V následujících podkapitolách je uveden přehled perspektivních tiskových materiálů, jejich vlastností důležitých pro samotný 3D tisk a soupis jejich fyzikálních a chemických vlastností. V kapitole „Ostatní plasty“ se nachází stručný přehled dalších používaných plastů spolu s jejich klíčovými vlastnostmi pro 3D tisk. Je také nutno zmínit, že dva stejné materiály od dvou různých výrobců se budou svými vlastnostmi mírně lišit. To především z toho důvodu, že v průběhu výroby filamentu jsou do plastu přidávány další látky (např. pigmenty), čímž dochází k ovlivňování jeho vlastností. Zároveň se stává, že název plastu zahrnuje celou podskupinu plastů, které se svými vlastnostmi drobně liší [29].

1.4.1 PLA

PLA je zkratka označující plast tvořený z kyseliny polylactické (anglicky polylactic acid [30]). Jedná se o nejpoužívanější plast v FDM 3D tiskárnách [31], vzhledem k jeho značné nenáročnosti na použití a kvůli jeho velmi nízké ceně [32]. Zmiňovaná nenáročnost na jeho použití souvisí s tím, že má v porovnání s ostatními užívanými plasty nižší bod tání a v průběhu jeho chladnutí nedochází k výrazné změně jeho velikosti. Není tedy nutné užívat specializovanějšího vybavení pro jeho bezproblémový tisk.

Při tisku dochází k tvorbě výparů, které nejsou téměř cítit, což jej dělá přijatelným pro domácí použití. Další obrovskou výhodou, jak bylo zmíněno výše, je jeho malá změna velikosti vlivem chladnutí. Kvůli tomu bývá PLA doporučován pro tisk velkých povrchů, kde by v případě užití jiných materiálů mohlo dojít k delaminaci jednotlivých vrstev či k odlepení výtisku od tiskové podložky vlivem špatného chlazení. PLA je po roztavení velice lehké nanášet, což umožňuje tisknout vysokou rychlostí. PLA nabízí dobrou rozměrovou přesnost [33], proto je vhodný pro použití tam, kde je požadována vysoká přesnost výtisku. Zároveň je PLA biodegradabilní plast vyráběný z obnovitelných zdrojů, což z něj dělá ekologičtější volbu ve srovnání s jinými (syntetickými) plasty. Ve své čisté formě je použitelný pro kontakt s potravinami, protože v pevném skupenství není toxický [32]. Je však nutné se ujistit, že výrobce konkrétního filamentu nepřidal do výrobku toxické přísady, například některé pigmenty.

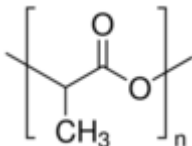
Naopak co se nevýhod PLA týče, tento materiál má nízkou teplotu skelného přechodu, což způsobuje jeho nevhodnost pro výtisky, které budou vystaveny vyšší teplotě. PLA dále vyžaduje neustálé chlazení čerstvě vytlačeného plastu, aby nedocházelo k jeho posunu od místa, kde měl být nanesen. Za působení slunečního záření dochází ke křehnutí

výtisků z PLA [33], proto bývá pro venkovní aplikace nevhodný. Ve srovnání s ostatními plasty bývají výtisky z PLA méně odolné vůči nárazům a mechanickému namáhání [32].

Co se chemické rozpustnosti týče, PLA je rozpustný především v aprotických polárních rozpouštědlech (tedy takových rozpouštědlech, která jsou velice slabými donory vodíkových vazeb [34]), například tedy v aminech a esterech. Naopak je nerozpustný ve většině protických polárních rozpouštědel a v nepolárních rozpouštědlech [35].

V následující tabulce se nachází stručný přehled základních chemických a fyzikálních vlastností PLA:

Tabulka 1 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti PLA [32] [36]

Název:	Kyselina polylactonová
Chemický vzorec:	$(C_3H_4O_2)_n$
Chemická struktura:	
CAS:	26100-51-6
Hustota:	1,21-1,43 g/cm ³
Teplota skelného přechodu:	60-65 °C
Teplota tání:	150-160 °C
Tisková teplota:	178-240 °C
Pevnost v tahu:	49-56 MPa
Pevnost v ohybu:	48-110 MPa
Prodloužení při přetržení:	0,5-9,2 %
Rozpustnost:	např. dichlormethan, tetrahydrofuran, chloroform

1.4.2 ABS

ABS, celým názvem akrylonitrilbutadienstyren, je další velmi využívaný materiál pro 3D tisk. ABS je kopolymer skládající se z celkem tří samostatných monomerů – z akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Každý z těchto monomerů mu přidává určitou vlastnost, proto změnou poměru těchto tří složek se mění i celkové mechanické vlastnosti ABS [29]. Své uplatnění nachází především v aplikacích, kde se předpokládá velké mechanické namáhání výtisku, či vysoká teplotní odolnost. Spolu s PLA je ABS jedním z nejlevnějších materiálů využívaných pro 3D tisk [32]. Vzhledem k vyšším tiskovým teplotám je vhodné pro některé filamenty z ABS používat tiskové hlavy bez teflonové vložky, neboť by vlivem vysoké tiskové teploty mohlo docházet k jejímu rozpadu. I kvůli jeho dalším vlastnostem, které v důsledku zvyšují požadavky na vybavení samotné tiskárny, je ABS považován za náročnější plast pro tisk.

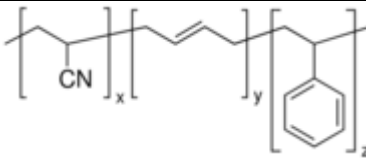
Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou ABS je jeho vysoká teplotní odolnost způsobená relativně vysokou teplotou skelného přechodu v porovnání s ostatními plasty, stejně jako jeho vysoká houževnatost a odolnost vůči nárazům [32] [33]. Výhoda ABS spočívá také v tom, že není nutné používat ventilátor pro chlazení čerstvě natisknutých vrstev. Další z výhod je jeho rozpustnost v acetonu, díky čemuž je možné výtisky z ABS vyhlazovat (viz. kapitola 1.2), či lehce lepit dohromady.

Největší nevýhodou ABS pro 3D tisk (obzvláště pak v hobby odvětví 3D tisku) je to, že při tisku dochází k uvolňování velkého množství toxických výparů a nanočástic, které mohou mít neblahý vliv na zdraví uživatele. Ačkoliv k tvorbě par a částic dochází i u jiných plastů, ABS je výrazně více toxický [37]. Proto je doporučováno tisknout z ABS pouze v dobře ventilovaných prostorách. ABS také není odolný vůči ultrafialovému záření, po dlouhodobém vystavení výtisků z ABS tomuto záření dochází k tvorbě prasklin, což z ABS dělá nevhodný materiál pro venkovní užití [29]. V případě hoření ABS (anebo i při jeho nadměrném zahřívání) dochází k uvolňování velkého množství kouře, který je opět toxický [32]. Vzhledem k tomu, že je ABS tvořen z toxických monomerů, není vhodný pro kontakt s potravinami. ABS je znám pro svůj velký poměr smrštění při chladnutí, což při 3D tisku způsobuje buď kroucení výtisku, nebo delaminaci natisknutých vrstev. To má neblahý vliv na samotnou spolehlivost a pevnost výtisků, vzhledem k anizotropní povaze 3D výtisků. Pro zajištění kvalitního výtisku s dobrými mechanickými vlastnostmi je tedy pro tisk nutné použít vyhřívanou tiskovou podložku, a celou tiskárnu je vhodné umístit do uzavíratelné komory, v níž bude teplota o několik jednotek až desítek °C vyšší než teplota okolního prostředí [29].

ABS, stejně jako PLA, je rozpustný především v aprotických polárních rozpouštědlech (např. esterech a ketonech [32]). Většina protických polárních a nepolárních rozpouštědel nemá na ABS vliv [38].

V následující tabulce se nachází stručný přehled základních chemických a fyzikálních vlastností ABS:

Tabulka 2 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti ABS [32] [36]

Název:	Akrylonitrilbutadienstyren
Chemický vzorec:	$(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$
Chemická struktura:	
CAS:	9003-56-9
Hustota:	1,06-1,08 g/cm ³
Teplota skelného přechodu:	105 °C
Teplota tání:	Není, látka je amorfní
Tisková teplota:	198-236 °C
Pevnost v tahu:	26,4-50 MPa
Pevnost v ohybu:	54-73 MPa
Prodloužení při přetržení:	1-57 %
Rozpustnost:	např. aceton, dichlormethan, chloroform

1.4.3 PETG

PETG je kopolymer polyethyltereftalátu – PET – což je plast vyráběný z monomerů kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Pro výrobu PETG je část etylenglykolu ve struktuře tohoto plastu nahrazena monomery cyklohexandimethanolu – a to v různých poměrech, což dále ovlivňuje vlastnosti tohoto materiálu [32]. To je důvod, proč se materiál označuje jako PETG – zkratka odpovídá názvu „PET s modifikovaným glykolem“ [39]. Připojení cyklohexandimethanolu do řetězce PET zapříčiňuje amorfnost tohoto materiálu. To vede k výraznému poklesu teploty skelného přechodu a potřebné teploty pro tisk materiálu v porovnání s klasickým PET. Materiál je díky této úpravě vhodný pro použití v 3D tiskárnách, zatímco si stále zachovává mechanické vlastnosti a chemickou odolnost PET [32]. PETG je považován za kompromis mezi dobrými tiskovými, termálními a mechanickými vlastnostmi.

Hlavní výhoda PETG spočívá v jeho dobré schopnosti přilnout na dříve vytištěné vrstvy. To má za následek vyšší pevnost ve směru tisku výtisku v porovnání například s výtiskem z PLA. Zároveň, jak již bylo řečeno, si PETG zachovává mnoho vlastností PET. Tento materiál je lehký, pevný, odolný vůči nárazům a chemikáliím. Na rozdíl od výtisků z ABS a PLA mají výtisky z PETG tendenci se při mechanickém namáhání v tahu natáhnout, dokud nedojde k jejich přetržení, spíše než aby došlo k prasknutí. Zároveň poskytuje relativně vysokou tepelnou odolnost, vzhledem k vyšší teplotě skelného přechodu (v porovnání s PLA je tato hodnota vyšší, s ABS naopak nižší) je vhodný na

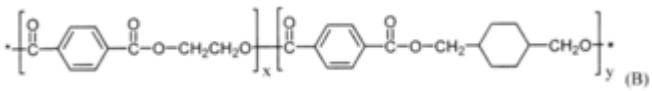
tepelně náročnější aplikace. I přes tuto vyšší tepelnou odolnost však nedochází k takovému smršťování při chladnutí jako v případě ABS, což znamená, že není tolik náchylný ke kroucení či delaminaci v průběhu tisku. Zároveň je PETG použitelný pro kontakt s jídlem [32]. PETG je také vhodný materiál pro tisk průhledných výtisků, protože bez přítomnosti pigmentu je sám o sobě transparentní. Další z předností tohoto materiálu je jeho odolnost vůči ultrafialovému záření. Je tedy vhodný pro výtisky do venkovních aplikací [39].

Naopak co se nevýhod týče, PETG má tendenci zanechávat na povrchu výtisků velké množství tenkých vláken. K tomu dochází při pohybu tiskové hlavy mezi částmi výtisku skrze prázdný prostor. Uvolněním tlaku v trysce by měl roztavený plast uvnitř trysky přestat vytékat, avšak stejně dochází k zanechávání drobných vláken vedoucích od místa, ke došlo k uvolnění tlaku, do dalšího místa na výtisku. U většiny plastů dojde v průběhu pohybu tiskové hlavy k přetržení tohoto vlákna. Avšak vzhledem k dobré tažnosti PETG u něj k tomuto přetržení většinou nedojde, což vede právě k výše zmíněnému množství tenkých vláken na povrchu výtisku. Tato vlákna mají však negativní dopad pouze na vzhled výtisku a je možné se jich lehce zbavit například opálením. Další nevýhodou PETG je jeho nesnadné lepení a barvení – a to vzhledem k jeho relativně vysoké chemické odolnosti [39].

PETG je opět rozpustný především v aprotických polárních rozpouštědlech, naopak většina protických polárních a nepolárních rozpouštědel na něj nemá vliv [40].

V následující tabulce se nachází stručný přehled základních chemických a fyzikálních vlastností PETG:

Tabulka 3 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti PETG [32]

Název:	Polyethyltereftalát-glykol
Chemický vzorec:	$(C_{10}H_8O_4 \cdot C_{16}H_{18}O_4)_n$
Chemická struktura:	
CAS:	25640-14-6
Hustota:	1,27-1,29 g/cm ³
Teplota skelného přechodu:	80-82 °C
Teplota tání:	Není, látka je amorfní
Tisková teplota:	220-250 °C
Pevnost v tahu:	26-45,8 MPa
Pevnost v ohybu:	52-80 MPa
Prodloužení při přetržení:	120-190 %
Rozpustnost:	např. dichlormethan, tetrahydrofuran, chloroform

1.4.4 SBS

SBS (styrenbutadienstyren) je dalším z používaných kopolymerů pro 3D tisk. Skládá se ze dvou monomerů styrenu, mezi nimiž se nachází monomer butadienu. Styren zajišťuje materiálu vysokou pevnost, zatímco díky butadienu získává flexibilitu. Tento materiál je vhodný především pro aplikace, kde se předpokládá vysoké mechanické namáhání a kde by u jiných materiálů mohlo docházet k rychlému opotřebení [32]. Zároveň je tento materiál dobře tepelně odolný z důvodu vyšší teploty skelného přechodu, která je blízká teplotě skelného přechodu PETG. Tento materiál není zdaleka tolik rozšířený jako dříve zmíněné materiály, především díky jeho vysoké ceně.

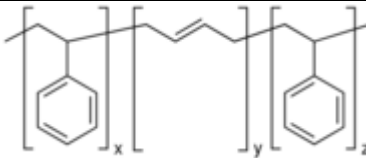
Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou SBS je jeho vysoká pevnost a odolnost vůči mechanickému namáhání, dobrá tepelná odolnost a celková chemická odolnost srovnatelná s PET. SBS je zároveň dobře rozpustný v roztoku D-Limonenu, což umožňuje snadné vyhlazování povrchu výtisků z SBS [32]. Tento materiál je zároveň bezpečný pro kontakt s jídlem. Při tisku dochází pouze k malému smršťování čerstvě natisknutých částí, tedy výtisky nejsou náchylné k delaminaci či kroucení. SBS dosahuje vysokého stupně transparentnosti, obzvláště po naleptání jeho povrchu, proto se hodí pro výtisky, kde je požadována průhlednost [41].

Největší nevýhodou tohoto materiálu je, jak již bylo řečeno, jeho velice vysoká cena, která se pohybuje až na pětinasobku ceny za kilogram v porovnání s PLA či ABS [32]. Zároveň je SBS filament řazen mezi pružnější plasty, což zvyšuje nároky na 3D tiskárnu. SBS filament totiž může snadno ucpat trysku, popřípadě tisk bez vhodného vybavení vede k nekonzistenci ve vytlačovaném materiálu po retrakci filamentu.

SBS je možné rozpouštět zmíněným D-limonenem, popřípadě xylenem či dichlormethanem [42].

V následující tabulce se nachází stručný přehled základních chemických a fyzikálních vlastností SBS:

Tabulka 4 - Základní chemické a fyzikální vlastnosti SBS [36] [42]

Název:	Styrenbutadienstyren
Chemický vzorec:	$(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_8H_8)_n$
Chemická struktura:	
CAS:	9003-55-8
Hustota:	1,01 g/cm ³
Teplota skelného přechodu:	80 °C
Teplota tání:	Není, látka je amorfní
Tisková teplota:	220-260 °C
Pevnost v tahu:	24 MPa
Pevnost v ohybu:	36 MPa
Prodloužení při přetržení:	250 %
Rozpustnost:	např. aceton, dichlormethan, chloroform

1.4.5 Ostatní plasty

Pro 3D tisk bývá využíváno velkého množství dalších plastů. Každým rokem se objevují nové typy plastů ve formě filamentů pro 3D tiskárny, popřípadě modifikace již existujících materiálů, které buď modifikují vzhled filamentu, či jeho tiskové vlastnosti. Příkladem mohou být materiály jako PLA+ či HD PLA, které mají poskytovat například vyšší teplotní odolnost za zachování tiskových vlastností klasického PLA, či vylepšení některých tiskových vlastností PLA. Zároveň existují různé modifikace s přidanými aditivami (typicky bývá základním materiálem PLA, právě díky dobrým tiskovým vlastnostem). Jedná se například o filamenty imitující dřevo, kov, nebo filamenty, které ve tmě svítí. Je také možné narazit na filamenty, které při tisku uvolňují příjemnou vůni, například kávy. Popřípadě můžou být vylepšené mechanické vlastnosti filamentu přidáním uhlíkových vláken. K těmto materiálům je vždy nutné přistupovat v závislosti na použitém aditivu, neboť chemické leptání nemusí být vždy nejvhodnější způsob úpravy jejich povrchu [43].

Další skupinou materiálů jsou flexibilní materiály, které nacházejí uplatnění ve výrobě pružných a ohebných filamentů. Většinou se jedná o termoplastický polyuretan (TPU), který nabízí vysokou ohebnost a elasticitu, zatímco si zachovává určitou mechanickou odolnost [44].

HIPS, tedy vysoce nárazový polystyren, je další ze skupiny plastů založených na styrenu, který lze používat například jako podpůrný materiál pro výtisky s ABS (neboť bývá tisknut při podobné teplotě) či jako samostatný tiskový materiál. Důvodem je totiž jeho rozpustnost v limonenu, stejně jako například SBS [32].

ASA (akrylonitrilstyrenakrylát) je materiál velice blízký ABS, který je považován za jeho alternativu pro venkovní aplikace, kvůli jeho vysoké odolnosti vůči ultrafialovému záření. Výpary produkované při tisku jsou, jako v případě ABS, toxické [33].

PVA (polyvinyl alkohol) bývá používán jako podpůrný materiál komplexnějších výtisků, protože je rozpustný ve vodě. Hotový výtisk z jiného materiálu, který využívá PVA jako podpůrný materiál, pak tedy stačí pouze vložit do vody, aby došlo k úplnému odstranění i špatně přístupných podpor, jejichž odebrání je jinak náročné [33].

Nylon (také označován jako PA – polyamid) je náročnějším tiskovým materiálem, který však propůjčuje výtiskům extrémní pevnost a odolnost ve srovnání s výtisky z ostatních běžně užívaných materiálů. Má vynikající přilnavost jednotlivých vrstev, je flexibilní, tepelně a chemicky odolný. Navíc má nízký součinitel tření, což jej předurčuje k použití tam, kde se předpokládá velké namáhání výtisku [44].

PC (polykarbonát) je další náročný materiál na tisk, který má opět vynikající vlastnosti ve srovnání s ostatními běžně užívanými plasty. Je vysoce tepelně stabilní, extrémně pevný, při namáhání výtisku z PC dochází spíše k prohýbání než k prasknutí. Při tisku dochází k tvorbě velmi velkého množství ultra jemných částic, které jsou zdraví škodlivé [32].

PP (polypropylen) je velice náročným materiálem pro tisk, neboť při tisku dochází k extrémnímu kroucení vlivem chladnutí materiálu. Jeho výhodou je však jeho odolnost vůči únavě, což z něj dělá excelentní materiál například pro tisk pantů, u nichž by při volbě jiného materiálu došlo k poškození po pár použitích [33].

Další plastové materiály používané pro tisk jsou například PMMA či PEEK, které mají podobné vlastnosti jako PC, tedy hodí se pro aplikace, kde je požadována extrémně vysoká teplotní odolnost. Dále pak existuje velké množství různých modifikací již zmíněných plastů [32] [44].

1.5 Použitelná rozpouštědla

Pro leptání povrchu výtisků v zařízení byla vybrána čtyři rozpouštědla. Jejich výběr byl podmíněn jejich relativně dobrou dostupností, dobrými leptacími vlastnostmi a přiměřenou nebezpečností. Zároveň bylo při výběru rozpouštědel dbáno na to, aby použitá rozpouštědla mohla leptat co největší množství používaných plastů pro 3D tisk, tedy aby zařízení bylo použitelné pro co největší množství materiálů.

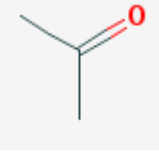
Velké množství použitelných rozpouštědel jsou toxické či vysoce toxické látky (jako například fenol či tetrachlorethan [36]), popřípadě se jedná o vysoce agresivní látky, které nejsou chemicky kompatibilní s běžně dostupnými konstrukčními materiály, z nichž má být zařízení zhotoveno [38] [45], což je činí nepoužitelnými v navrhovaném zařízení.

Na základě výše představených požadavků byla vybrána tato rozpouštědla – aceton, dichlormethan, chloroform a tetrahydrofuran. Důležité vlastnosti a parametry těchto chemikálií jsou popsány v následujících podkapitolách.

1.5.1 Aceton

Aceton (systematicky propanon či dimethylketon) je za běžných podmínek bezbarvá kapalina s charakteristickým zápachem připomínajícím vůni máty. Je těkavý, vysoce hořlavý. Ačkoliv je ve srovnání s ostatními průmyslovými rozpouštědly relativně méně toxický, v malých dávkách způsobuje podráždění očí a dýchacího traktu. Ve vyšších dávkách může způsobovat ztrátu vědomí, srdeční a dýchací obtíže, nakonec i smrt. Výpary jsou těžší než vzduch, mají tendenci klesat k zemi. Je rozpustný ve vodě, sám slouží jako rozpouštědlo tuků, olejů, vosků, pryskyřic, gum, plastů a dalších v průmyslu užívaných materiálů. Kromě průmyslově výroby se aceton vyskytuje i v přírodě, například jako produkt metabolismu tuků u živočichů [46]. V následující tabulce se nachází přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností acetonu.

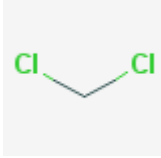
Tabulka 5 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností acetonu [46]

Název:	Aceton
Chemický vzorec:	C_3H_6O
Chemická struktura:	
CAS:	67-64-1
Molární hmotnost:	58,08 g·mol ⁻¹
Teplota tání:	-95 °C
Teplota varu:	56 °C
Teplota vzplanutí:	-18 °C
Teplota vznícení:	465 °C
Hustota:	0,7845 g·cm ⁻³ při 20 °C
Dynamická viskozita:	0,32 cP při 20 °C
Relativní hustota par:	2,0 (vzduch = 1)
Tenzne par:	24 kPa při 20 °C
Mísitelné s:	Voda, alkoholy, ethery
H-věty:	H225, H319, H336
P-věty:	P210, P233, P240, P241, P242, P243, P261, P264, P271, P280, P303+P361+P353, P304+P340, P305+P351+P338, P312, P337+P313, P370+P378, P403+P233, P403+P235, P405, P501
IDLH:	2500 ppm

1.5.2 Dichlormethan

Dichlormethan (dále jen DCM, známý též jako metylenchlorid) je za běžných podmínek bezbarvou kapalinou. Má nasládlý zápach podobný zápachu chloroformu. Je extrémně těkavý, k hoření dochází až při relativně vysokých teplotách. Při jeho vdechnutí dochází k jeho rychlé absorpci do krevního oběhu. Nadýchání se většího množství DCM může vést k otoku plic, ztrátě sluchu, ztrátě vědomí a poškození ledvin a jater. Vystavení se extrémním dávkám vede k úmrtí. Na základě výzkumu na zvířatech je DCM považován za karcinogen. K akutní intoxikaci může dojít i po požití DCM. Při kontaktu s kůží dochází k pomalejšímu absorbování DCM do tělního oběhu než v případě nadýchání se či požití. Dráždí oči a kůži, po delším kontaktu s kůží může způsobovat popáleniny. Je opět rozpustný ve vodě, využití nachází především v průmyslu při výrobě insekticidů a herbicidů, ale i při výrobě jídla, antibiotik, vitamínů, steroidů či textilií [47]. V následující tabulce se nachází přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností dichlormethanu.

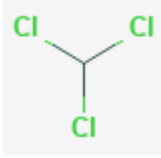
Tabulka 6 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností DCM [47]

Název:	Dichlormethan
Chemický vzorec:	CH_2Cl_2
Chemická struktura:	
CAS:	75-09-2
Molární hmotnost:	84,927 g·mol ⁻¹
Teplota tání:	-97 °C
Teplota varu:	40 °C
Teplota vzplanutí:	93,4 °C
Teplota vznícení:	605 °C
Hustota:	1,3255 g·cm ⁻³ při 20 °C
Dynamická viskozita:	0,437 cP při 20 °C
Relativní hustota par:	2,9 (vzduch = 1)
Tenze par:	47,4 kPa při 20 °C
Mísitelné s:	Voda, alkoholy, ethery
H-věty:	H351
P-věty:	P201, P202, P281, P308+P313, P405, P501
IDLH:	2300 ppm

1.5.3 Chloroform

Chloroform (systematicky trichlormethan) je za běžných podmínek bezbarvá kapalina s charakteristickým nasládlým etherovým zápachem. Je těkavý, za normálních podmínek nehořlavý. Jedná se o středně toxickou chemikálii. V malém množství způsobuje podráždění kůže a očí, bolest hlavy, malátnost a nevolnost. Ve vyšších dávkách způsobuje ztrátu vědomí, srdeční arytmie a smrt. Dlouhodobé vystavení látky způsobuje poškození jater a ledvin. Z pokusů na zvířatech bylo zjištěno, že chloroform je pro ně karcinogenní, avšak není známo, jestli má stejný efekt na člověka. Jeho páry mají vyšší hustotu než vzduch, proto klesají k zemi. Je rozpustný ve vodě, avšak díky své hustotě klesá ke dnu. V minulosti byl využíván jako anestetikum, v dnešní době je užíván nejčastěji v průmyslu pro výrobu freonů či v laboratořích jako rozpouštědlo. V malém množství se může vyskytovat i ve vodě jako vedlejší produkt chlorace vody [48]. V následující tabulce se nachází přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností chloroformu.

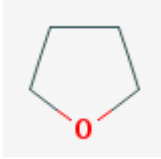
Tabulka 7 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností chloroformu [49]

Název:	Chloroform
Chemický vzorec:	$CHCl_3$
Chemická struktura:	
CAS:	67-66-3
Molární hmotnost:	119,369 g·mol ⁻¹
Teplota tání:	-64 °C
Teplota varu:	62 °C
Hustota:	1.4832 g·cm ⁻³ při 20 °C
Dynamická viskozita:	0,563 cP při 20 °C
Relativní hustota par:	4,12 (vzduch = 1)
Tenze par:	21,2 kPa při 20 °C
Mísitelné s:	Voda, alkoholy, ethery
H-věty:	H302, H315, H319, H331, H351, H361d, H372
P-věty:	P201, P202, P260, P261, P264, P270, P271, P280, P281, P301+P312, P302+P352, P304+P340, P305+P351+P338, P308+P313, P311, P314, P321, P330, P332+P313, P337+P313, P362, P403+P233, P405, P501
IDLH:	500 ppm

1.5.4 Tetrahydrofuran

Tetrahydrofuran (dále jen THF, systematicky oxolan) je za běžných podmínek bezbarvá kapalina s charakteristickým zápachem připomínajícím vůni ovoce. Je těkavý a vysoce hořlavý. Na základě pokusů na zvířatech je považován za průměrně toxickou látku, avšak není dostatečné množství dat prokazující efekty THF na člověka. Zvířata měla podrážděnou kůži, sliznice dýchací soustavy a oči. Vystavení THF způsobovalo anestezii zvířat, pokles tlaku a dýchací problémy. Od pracovníků provádějící tyto testy s THF byly nahlášeny silné bolesti zadní části hlavy. Nebyly pozorovány žádné karcinogenní účinky. Látka je opět rozpustná ve vodě, využívá se jako rozpouštědlo pryskyřic či jako součást povrchových úprav [48]. V následující tabulce se nachází přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností tetrahydrofuranu.

Tabulka 8 - Přehled fyzikálních, chemických a toxikologických vlastností THF [48]

Název:	Tetrahydrofuran
Chemický vzorec:	C_4H_8O
Chemická struktura:	
CAS:	109-99-9
Molární hmotnost:	72,107 g·mol ⁻¹
Teplota tání:	-108,5 °C
Teplota varu:	66 °C
Teplota vzplanutí:	-14,5 °C
Teplota vznícení:	321 °C
Hustota:	0,888 g·cm ⁻³ při 20 °C
Dynamická viskozita:	0,53 cP při 20 °C
Relativní hustota par:	2,5 (vzduch = 1)
Tenze par:	19,3 kPa při 20 °C
Mísitelné s:	Voda, alkoholy, ketony, estery, uhlovodíky, ethery
H-věty:	H225, H319, H335, H351
P-věty:	P201, P202, P210, P233, P240, P241, P242, P243, P261, P264, P271, P280, P281, PP303+P361+P353, P304+P340, P305+P351+P338, P312, P337+P313, P370+P378, P403+P233, P403+P235, P405, P501
IDLH:	2000 ppm

1.6 Chemická kompatibilita

Na základě tabulek chemické kompatibility ([35] [38] [40] [45] [50] [51] [52] [53]) pro různé materiály byly sestaveny dvě tabulky. První tabulka se zabývá chemickou rezistivitou materiálů využívaných pro 3D tisk (zmíněných v kapitole 1.4) vůči vybraným rozpouštědlům popsaným v kapitole 1.5. V tabulce se nenachází materiál PVA, který je rozpustný ve vodě. „Silný efekt“ znamená, že látka je rychle leptána daným rozpouštědlem. „Slabý efekt“ znamená, že změna materiálu je pouze slabšího rázu (např. dojde k bobtnání povrchu materiálu), či že k pozorování efektu rozpouštědla na materiál je nutný mnohohodenní nepřetržitý kontakt. „Bez efektu“ znamená, že materiál s rozpouštědlem nereaguje, pomlčka pak značí nedostatek dat. Je nutné poznamenat, že ačkoliv u některých materiálů a rozpouštědel může docházet k reakci, jen samotná existence reakce nezaručuje dosažení požadovaného efektu vyhlazení povrchu výtisků potřebného pro správnou funkci navrhovaného zařízení. Tedy například pokud dojde při kontaktu materiálu s rozpouštědlem k okamžitému nabobtnání materiálu, materiál v kombinaci s daným rozpouštědlem není pro navrhované zařízení použitelný

Tabulka 9 - Tabulka chemické rezistivity vybraných plastů vůči vybraným organickým rozpouštědlům [35] [38] [40] [50] [51] [52]

Materiál	Aceton	Dichlormethan	Chloroform	Tetrahydrofuran
PLA	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
ABS	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
PETG	Silný efekt	Silný efekt	-	-
SBS	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
TPU	Silný efekt	-	Silný efekt	Silný efekt
HIPS	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
ASA	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
Nylon	Slabý efekt	Slabý efekt	Silný efekt	Bez efektu
PC	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
PP	Slabý efekt	Slabý efekt	Slabý efekt	Slabý efekt
PMMA	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
PEEK	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu

Z tabulky chemické rezistivity je patrné, že vybraná rozpouštědla mají efekt na téměř všechny popsané tiskové materiály.

Druhá tabulka má za úkol umožnit určení vhodných materiálů pro konstrukci navrhovaného zařízení. Požadavkem na tyto materiály je vysoká odolnost vůči všem chemikáliím, které by mohly být v zařízení použity. Stejně tak všechny vnitřní komponenty zařízení, které mohou přijít do styku s chemikáliemi, musejí být s těmito chemikáliemi kompatibilní. Tabulka představuje vliv vybraných rozpouštědel z kapitoly 1.5 na snadno dostupné konstrukční materiály. „Bez efektu“ znamená, že materiál a rozpouštědlo je kompatibilní a nedochází mezi nimi k reakci. „Slabý efekt“ znamená, že při nepřetržitém dlouhodobém vystavení materiálu rozpouštědlu dochází k poškození materiálu, nebo že materiál je rozpouštědlem slabě ovlivněn. „Střední efekt“ znamená, že dochází k určité reakci mezi materiálem a rozpouštědlem, což zabraňuje rozumnému použití daného materiálu v oblasti, kde by mohlo docházet ke styku s rozpouštědlem. „Silný efekt“ znamená, že dochází k rychlému poškození materiálu a je nepoužitelný v místě, kde může dojít ke kontaktu s rozpouštědlem. Pomlčka poté opět značí, že data pro daný materiál nejsou dostupná.

Tabulka 10 - Tabulka chemické kompatibility vybraných materiálů vůči vybraným organickým rozpouštědlům [45] [53] [54]

Materiál	Aceton	Dichlormethan	Chloroform	Tetrahydrofuran
304 SS	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu
316 SS	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu
Hliník	Bez efektu	Bez efektu	Silný efekt	Silný efekt
Mosaz	Bez efektu	Střední efekt	-	-
Kynar	Silný efekt	Silný efekt	Slabý efekt	Silný efekt
Teflon	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu
Keramika	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu
Viton	Silný efekt	Silný efekt	Bez efektu	Silný efekt
Silikon	Vedlejší efekt	-	Silný efekt	-
Neopren	Střední efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
Kaučuk	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt	Silný efekt
Epoxid	Vedlejší efekt	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu
Isopren	Slabý efekt	Silný efekt	Silný efekt	Střední efekt
EPDM	Slabý efekt	Silný efekt	Silný efekt	Střední efekt
Borosilikátové sklo	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu	Bez efektu

Pro posouzení toho, jaký materiál by ke konstrukci zařízení měl být skutečně použit, je však nutné započítat i další faktory, jako například cenu materiálu, jeho dostupnost či jeho opracovatelnost.

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Laboratorní experimenty

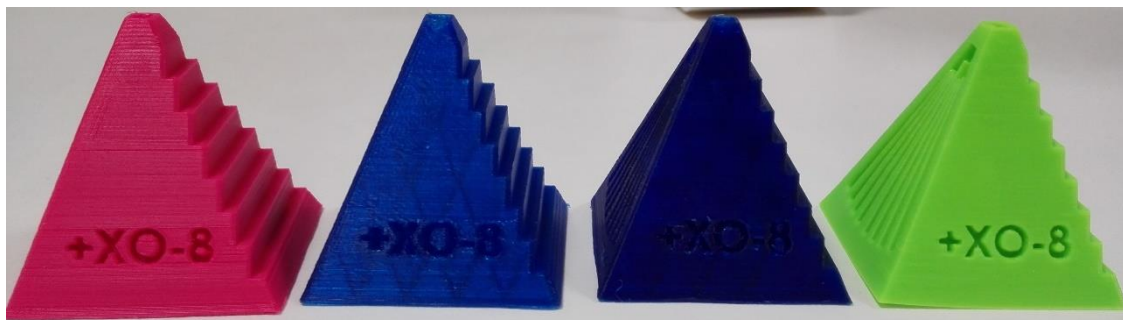
Pro nalezení odpovědi na hypotézu této práce (viz. úvod) byla provedena série laboratorních experimentů. Bylo vytisknuto celkem 20 3D výtisků, vždy po pěti výtiscích z téhož vybraného plastu, které sloužily jako vzorky pro měření. Následně byly provedeny tři druhy experimentu. První experiment testoval použitelnost metody chemického leptání povrchu výtisků za užití par vybraných rozpouštědel. Druhý experiment testoval použitelnost metody chemického leptání povrchu výtisků za užití aerosolu z vybraných rozpouštědel. Třetí experiment nakonec testoval chemickou odolnost epoxidu a hliníku vůči acetonu a DCM.

Při prvním experimentu byla jedna série vzorků ze všech materiálů – tedy PLA, ABS, PETG a SBS – leptána parami chloroformu, druhá série pak byla leptána roztokem acetonu a DCM v poměru 1:1. Třetí série byla leptána parami DCM. Čtvrtá série vzorků byla rozdělena na dvě skupiny – první z nich byly vzorky z PLA a PETG, které byly leptány parami THF, druhou skupinou byly vzorky z ABS a SBS, které byly leptány parami acetonu. Tato dělba čtvrté série vzorků byla provedena z toho důvodu, že se na základě teoretické rešerše předpokládal vyšší vliv THF na první skupinu vzorků v porovnání s acetonem, na rozdíl od druhé skupiny, u níž byl tento předpoklad opačný, tedy že aceton bude mít mnohem vyšší vliv na druhou skupinu vzorků. Všechny série byly vystaveny vlivu par chemikálií po několik jednotek až desítek hodin, v závislosti na pozorovaném efektu par na vzorky. Cílem prvního experimentu bylo zjistit použitelnost procesu leptání povrchu výtisků parami v navrhovaném zařízení.

Při druhém experimentu pak byla použita poslední série vzorků ze všech materiálů, tedy opět PLA, ABS, PETG a SBS. Vzorky byly na dobu pár minut vystaveny koncentrovanému aerosolu z roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1. Aerosol z roztoku těchto dvou chemikálií namísto aerosolu každé chemikálie zvlášť byl použit proto, že bylo v průběhu experimentu zjištěno, že použitý piezoelektrický modul není schopen vytvářet dostatečný objem aerosolu ze samotného DCM. Cílem druhého experimentu bylo zjistit použitelnost procesu leptání povrchu výtisků aerosolem v navrhovaném zařízení.

Při třetím experimentu byly slepeny dohromady dva kusy hliníku epoxidem na bázi bisfenolu A. Po uplynutí doby potřebné pro úplné vytvrzení epoxidu byly vytvořené vzorky vloženy do acetonu a DCM, kde byly ponechány po dobu jednoho týdne. Cílem třetího experimentu bylo ověření poznatků získaných teoretickou rešerší, tedy zjistit, je-li hliník a epoxidový spoj odolný vůči používaným rozpouštědlům.

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny připravené 3D výtisky z různých plastů, které sloužily jako vzorky pro měření. Růžový vzorek je zhotoven z PLA (viz. tabulka 1), světle modrý z SBS (viz. tabulka 4), tmavě modrý z PETG (viz. tabulka 3) a zelený z ABS (viz. tabulka 2).

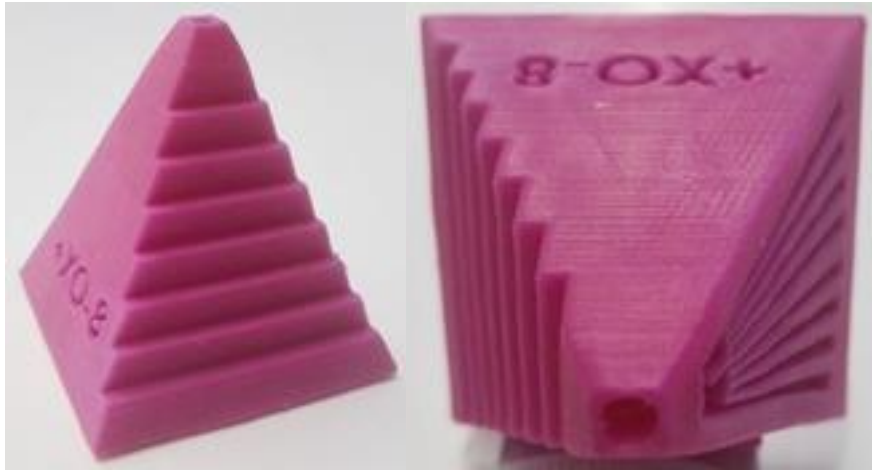


Obrázek 7 - Připravené vzorky 3D výtisků pro měření

2.1.1 Chemické leptání povrchu vzorků parami chloroformu

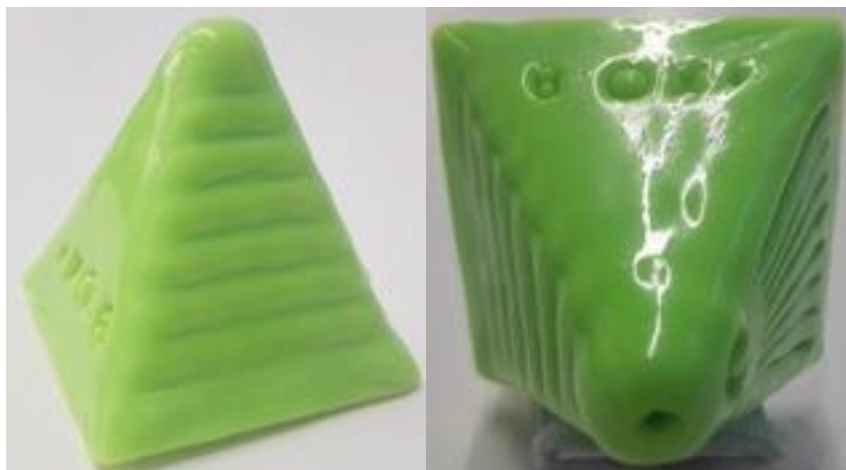
Pro otestování vlivu par chloroformu a jejich uplatnitelnost v navrhovaném zařízení byl použit exsikátor, do nějž bylo nalito cca 100 ml chloroformu. Na perforovanou desku exsikátoru byly následně umístěny vzorky ze všech 4 testovaných materiálů, tedy PLA, ABS, PETG a SBS. Exsikátor byl poté uzavřen a ponechán v klidu po dobu zhruba jednoho dne. Po uplynutí této doby byly testované vzorky z exsikátoru vyjmuty a opláchnuty pod proudem vody, která měla vzorky zbavit zbytků chloroformu. Následně byly vzorky ponechány na klidném místě po dobu dalšího týdne, aby se zajistilo naprosté odpaření zbývajícího chloroformu a vody použité na oplach, která mohla vtéct do vnitřních struktur vzorku.

Vzorky byly poté zdokumentovány. Výsledky leptání jsou na následujících obrázcích.



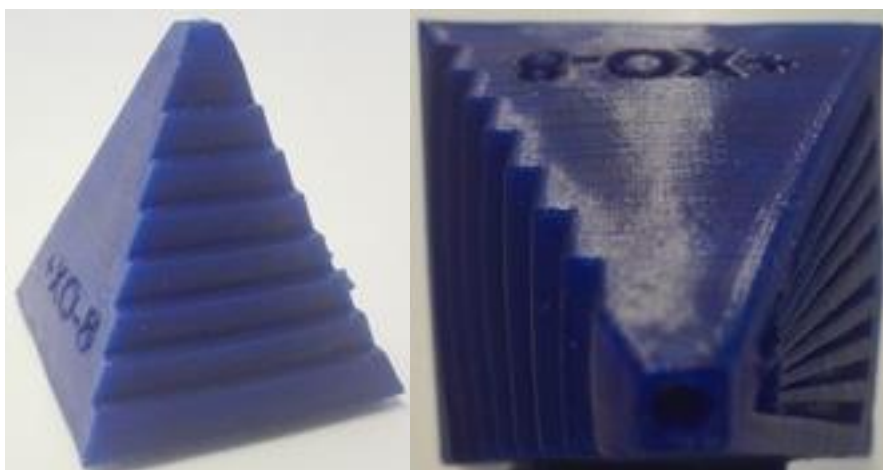
Obrázek 8 - Vzorek z PLA po leptání v parách chloroformu

Na obrázku výše je zobrazen vzorek z PLA z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Z obrázku je patrné, že páry chloroformu nemají na vzorek z PLA výrazný vliv, kromě nepatrné degradace barvy vzorku.



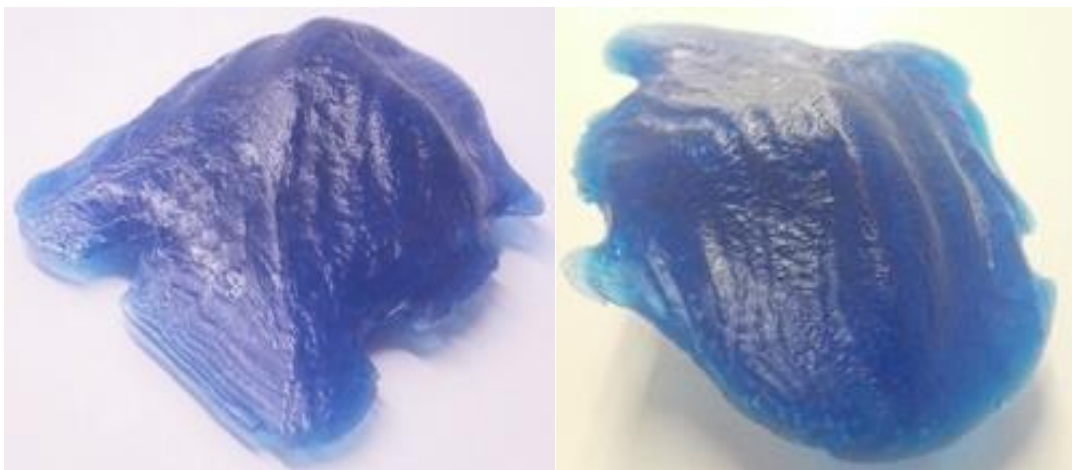
Obrázek 9 - Vzorek z ABS po leptání v parách chloroformu

Obrázek výše zobrazuje vzorek z ABS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Zde je vidět, že došlo k naprostému vyhlazení povrchu vzorku, jednotlivé tiskové vrstvy nejsou viditelné, avšak zároveň došlo k výraznému narušení celkové geometrie vzorku.



Obrázek 10 - Vzorek z PETG po leptání v parách chloroformu

Na výše zobrazeném obrázku je vzorek z PETG z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Páry chloroformu u tohoto vzorku nevyhladily tiskové vrstvy na povrchu vzorku, ale povrch se stal mnohem lesklejším. Došlo však k výraznému zkroucení vnějších stěn vzorku.

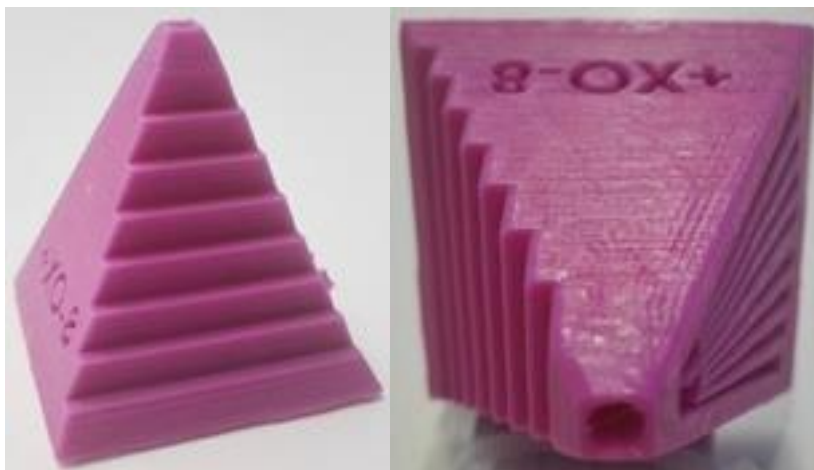


Obrázek 11 - Vzorek z SBS po leptání v parách chloroformu

Na posledním obrázku je vidět vzorek z SBS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). V průběhu experimentu došlo k úplnému zničení testovacího vzorku z důvodu příliš dlouhého vystavení vzorku parám chloroformu.

2.1.2 Chemické leptání povrchu vzorků parami roztoku acetonu a DCM

Na další sérii vzorků bylo testováno, jaký vliv mají na povrch vzorků páry roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1. Tento roztok byl použit z toho důvodu, že byl zároveň využíván pro leptání vzorků aerosolem (viz. 2.1.5). Proto byl zkoumán i vliv jeho par tvořených samovolným odpařováním na vzorky. Stejně jako v případě chemického leptání povrchu vzorků parami chloroformu byl pro experiment použit exsikátor, do něž bylo nalito cca 100 ml roztoku. Do exsikátoru byly opět vloženy vzorky ze všech 4 testovaných materiálů a exsikátor byl následně uzavřen a ponechán v klidu po dobu zhruba jednoho dne. Poté byly testované vzorky z exsikátoru vyjmuty a opláchnuty pod proudem vody. Vzorky byly opět ponechány na klidném místě po dobu dalšího týdne, aby se zajistilo naprosté odpaření zbývajících roztoku a vody použité na oplach. Poté byly vzorky zdokumentovány (viz. výsledky leptání roztokem acetonu a DCM na následujících obrázcích).



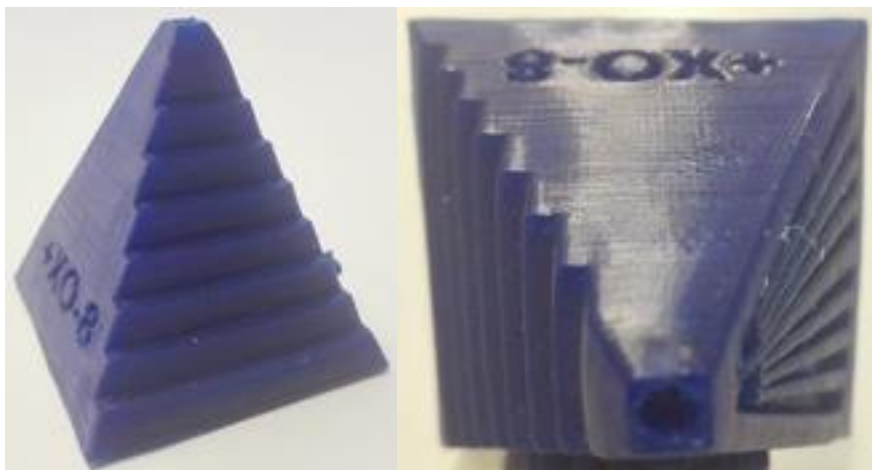
Obrázek 12 - Vzorek z PLA po leptání v parách roztoku acetonu a DCM

Na obrázku výše je vzorek z PLA z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Z hlediska vyhlazení tiskových vrstev měly páry roztoku acetonu a DCM na vzorek nepatrný vliv, ale došlo k mírnému zvýšení lesku povrchu za cenu mírné degradace barvy.



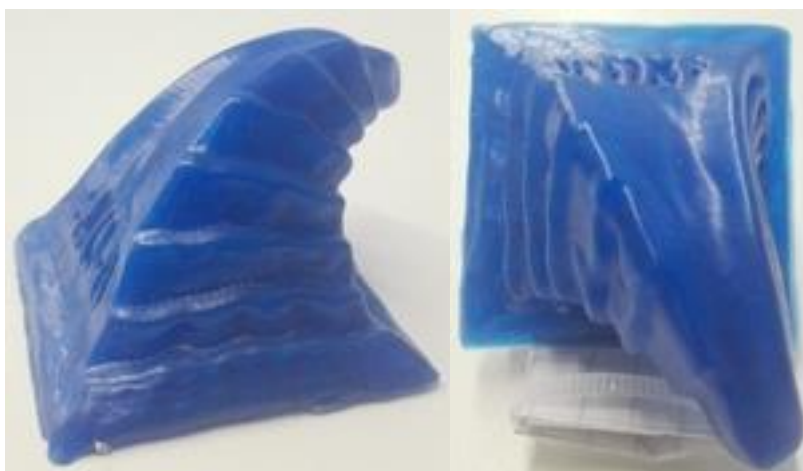
Obrázek 13 - Vzorek z ABS po leptání v parách roztoku acetonu a DCM

Obrázek výše zobrazuje vzorek z ABS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Jako v případě užití par chloroformu došlo sice k naprostému vyhlazení tiskových vrstev, zároveň však došlo k zásadnímu narušení celkové geometrie vzorku.



Obrázek 14 - Vzorek z PETG po leptání v parách roztoku acetonu a DCM

Na výše zobrazeném obrázku je vidět vzorek z PETG z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Je patrné, že došlo k částečnému vyhlazení povrchu, neboť tiskové vrstvy jsou méně výrazné. Zároveň došlo k navýšení lesklosti povrchu vzorku.



Obrázek 15 - Vzorek z SBS po leptání v parách roztoku acetonu a DCM

Poslední obrázek výše zobrazuje vzorek z SBS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Jako v případě vzorku z ABS došlo sice k naprostému vyhlazení tiskových vrstev, došlo však také k zásadnímu narušení celkové geometrie vzorku.

2.1.3 Chemické leptání povrchu vzorků parami DCM

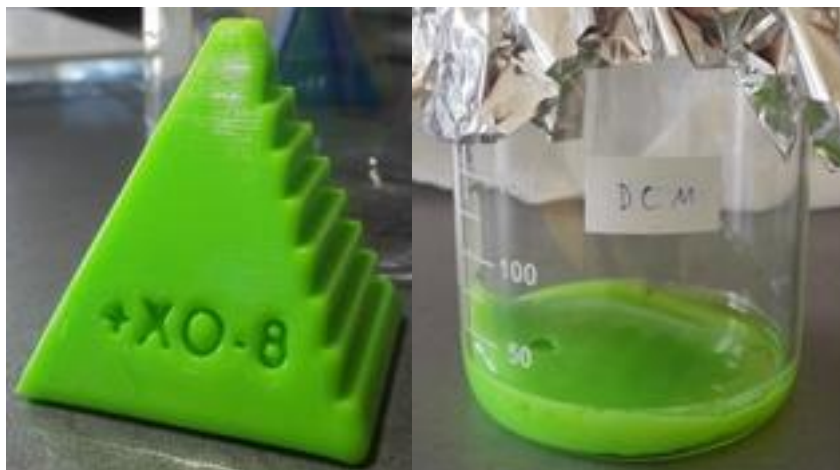
Další série vzorků byla vystavena vlivu par DCM po dobu cca 48 hodin. V tomto experimentu byl exsikátor nahrazen čtyřmi kádinkami, po jedné pro každý testovaný vzorek z jiného materiálu. Do každé z kádinek bylo nalito okolo 30 ml DCM. Tyto kádinky byly utěsněny provizorními víčky vytvořenými z hliníkové folie. K těmto víčkům byl ještě před zakrytím kádinek připevněn šroub, který byl následně zašroubován do testovaného vzorku. Tento úchyt tedy dovozoval vzorku zůstat po celou dobu testu nad hladinou DCM. Všechny kádinky se vzorky byly poté umístěny do digestoře. V průběhu experimentu byly vzorky vyjmuty z kádinek, aby mohl být doplněn DCM do kádinky, neboť vlivem odpařování a nedostatečného těsnění provizorního víčka docházelo k jeho rychlému odpařování. K doplnění DCM došlo zhruba po 24 hodinách od začátku experimentu, v tu dobu tedy došlo k první dokumentaci dosažených výsledků experimentu.

Po uplynutí 48 hodin od začátku experimentu byly všechny vzorky z kádinek vyjmuty a opláchnuty proudem vody jako v předchozích experimentech. Po týdnu sušení byly vzorky opět zdokumentovány.



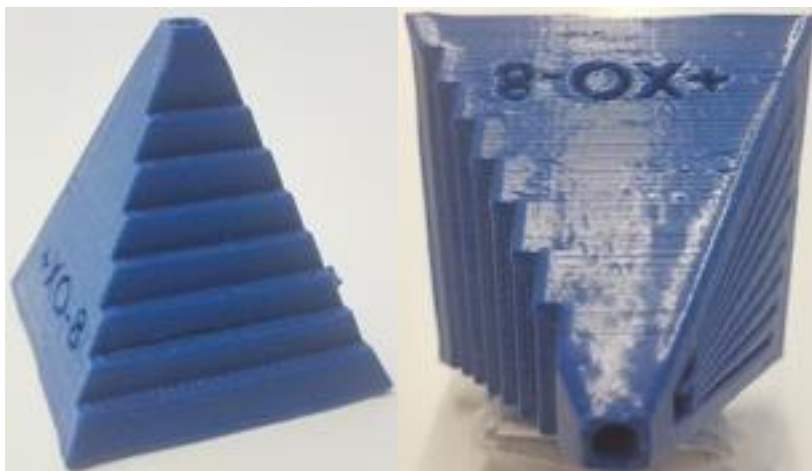
Obrázek 16 - Vzorek z PLA po leptání v parách DCM

Obrázek výše zobrazuje vzorek z PLA po 48 hodinách působení par DCM. Vlevo se nachází vzorek nafocený z boku, vpravo vzorek nafocený pod úhlem proti světlu. Je patrné, že ani po 48 hodinách nedošlo k vyhlazení tiskových vrstev na povrchu výtisku. Došlo však k mírné degradaci barvy a k deformaci spodní strany vzorku.



Obrázek 17 - Vzorek z ABS po leptání v parách DCM

Na obrázku výše je zobrazen vzorek z ABS. Vzhledem k tomu, že do uplynutí doby 48 hodin od začátku experimentu byl vzorek zničen (vpravo), obrázek vlevo zachycuje vzorek z ABS po 24 hodinách od začátku experimentu. Je vidět výrazné vyhlazení tiskových vrstev a navýšení lesklosti povrchu, avšak zároveň již došlo ke ztrátě rozměrových přesností vzorku, kdy je pozorovatelné značné zaoblení ostrých hran vzorku. Příliš dlouhá expozice DCM vede ke zničení vzorku.



Obrázek 18 - Vzorek z PETG po leptání v parách DCM

Na výše zobrazeném obrázku je vzorek z PETG po 48 hodinách působení par DCM z boku (vpravo) a pod úhlem proti světlu (vpravo). Tiskové vrstvy na povrchu vzorku byly lehce vyhlazeny, velmi se zvýšila lesklost povrchu.



Obrázek 19 - Vzorek z SBS po leptání v parách DCM

Na posledním obrázku výše je vidět vzorek z SBS. Jako v případě vzorku z ABS došlo po 48 hodinách působení par DCM ke zničení vzorku (vpravo), proto je vlevo zobrazen vzorek po 24 hodinách od začátku experimentu. Tiskové vrstvy se po 24 hodinách začaly vyhlazovat, avšak stále byly silně patrné obzvláště ve vrchní části výtisku. Lesklost povrchu se zvýšila. Příliš dlouhá doba expozice DCM ale opět vede ke zničení vzorku.

2.1.4 Chemické leptání povrchu vzorků parami acetonu a THF

Poslední série vzorků použitá pro testování vlivu par různých rozpouštědel na vzorky byla rozdělena na dvě skupiny vzorků. První skupina byla tvořena vzorky z PLA a PETG, které byly leptány parami THF. THF byl pro tuto skupinu vzorků vybrán z důvodu předpokladu vyššího vlivu jeho par na vybrané plasty. Druhá skupina pak byla tvořena vzorky z ABS a SBS, které byly vystaveny vlivu par acetonu. Aceton byl pro tuto skupinu vzorků vybrán z toho důvodu, že plasty ABS a SBS jsou si relativně blízké a u ABS je dobře zdokumentován proces chemického vyhlazování povrchu parami acetonu

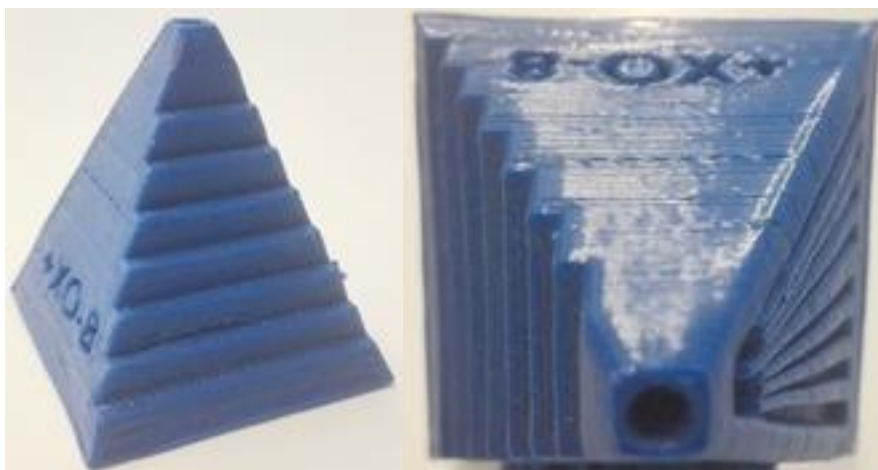
Obě skupiny vzorků byly jako v předchozím experimentu s parami DCM (viz. 2.1.3) zavěšeny do kádínek, v nichž se nacházelo cca 30 ml THF. V těchto kádínek byly ponechány zakryté provizorním víčkem po dobu 48 hodin. Po 24 hodinách od začátku experimentu byl do kádínek doplněn THF a vzorky byly současně zdokumentovány. Vzorky se po celou dobu experimentu nacházely v laboratorní digestoři.

Po uplynutí 48 hodin od začátku experimentu byly obě skupiny vzorků vyjmuty z kádínek a opláchnuty proudem vody pro odstranění zbytků chemikálií na povrchu vzorků. Následně byly vzorky ponechány v klidu po dobu jednoho týdne, aby došlo k jejich úplnému vysušení. Poté byly opět zdokumentovány.



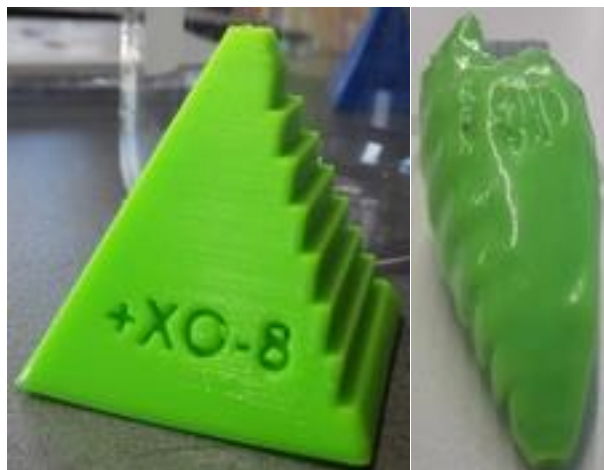
Obrázek 20 - Vzorek z PLA po leptání v parách THF

Na obrázku výše je zobrazen vzorek z PLA z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo), který byl leptán po dobu 48 hodin parami THF. Tiskové vrstvy na povrchu vzorku začaly být lehce vyhlazené, povrch se stal lesklejší. Došlo k mírnému zkroucení spodní strany vzorku a degradaci jeho barvy.



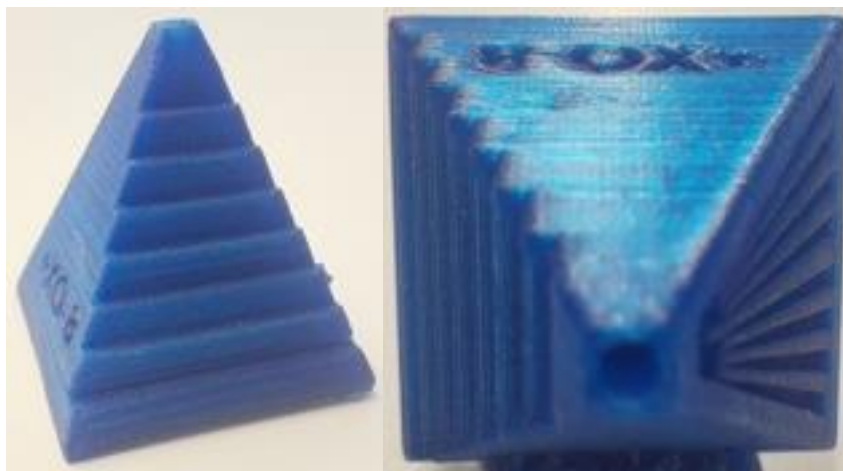
Obrázek 21 - Vzorek z PETG po leptání v parách THF

Obrázek výše zobrazuje vzorek z PETG z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 48 hodinách leptání parami THF. Tiskové vrstvy zůstaly viditelné, ačkoliv se povrch vzorku stal mnohem lesklejším. Došlo však také k delaminaci tiskových vrstev na několika místech vzorku, čímž byla výrazně narušena mechanická pevnost vzorku.



Obrázek 22 - Vzorek z ABS po leptání v parách acetonu

Na výše zobrazeném obrázku je vzorek z ABS po 24 hodinách vystavení vzorku parám acetonu (vlevo) a pod úhlem proti světlu po 48 hodinách vystavení vzorku parám acetonu (vpravo). Po 24 hodinách bylo možné sledovat započetí vyhlazování tiskových vrstev na povrchu vzorku a mírné navýšení lesklosti povrchu. Současně však došlo k mírné deformaci spodní části vzorku. Po 48 hodinách působení par acetonu na vzorek byl vzorek zničen.



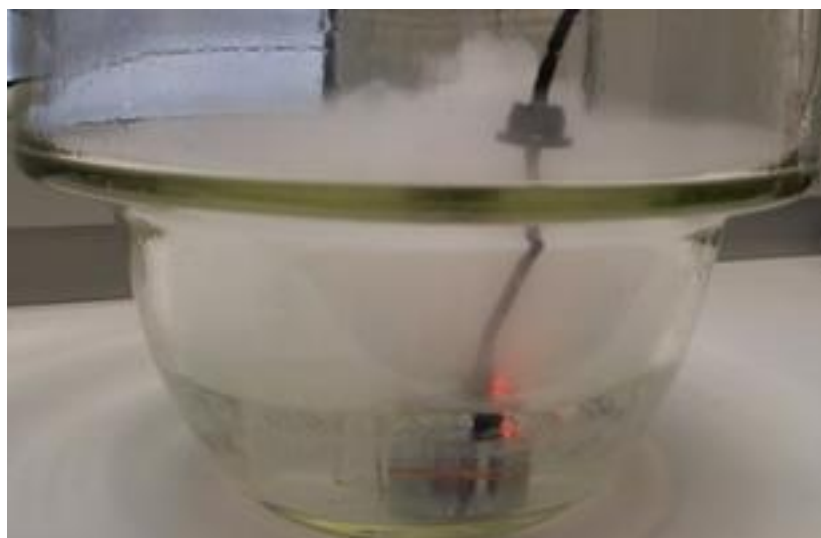
Obrázek 23 - Vzorek z SBS po leptání v parách acetonu

Na posledním výše zobrazeném obrázku je vzorek z SBS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 48 hodinách vystavení vzorku parám acetonu. Tiskové vrstvy začaly být méně zřetelné a povrch byl celkově lesklejší, avšak současně došlo k velké delaminaci tiskových vrstev ve spodní části vzorku.

2.1.5 Chemické leptání povrchu vzorků aerosolem roztoku acetonu a DCM

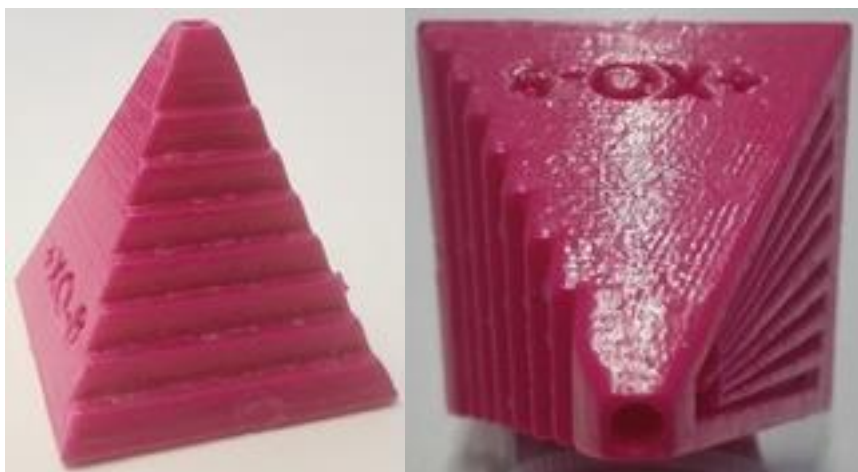
Při druhém experimentu byla použita poslední série vzorků ze všech materiálů, tedy opět PLA, ABS, PETG a SBS. Aby byla otestována uplatnitelnost procesu leptání povrchu vzorků aerosolem v navrhovaném zařízení, byl proveden experiment, který testoval vliv aerosolu roztoku acetonu a DCM na vzorky. Pro tvorbu aerosolu byl použit piezoelektrický modul využívající frekvenci 1.7 MHz pro buzení piezoelektrického měniče. Roztok acetonu a DCM v poměru 1:1 byl použit z toho důvodu, že obě látky vykazovaly velký potenciál pro rychlé leptání všech testovaných plastů, proto užití pouze jednoho roztoku namísto dvou různých chemikálií zajišťuje všestrannější použitelnost vyhlazovacího zařízení bez nutnosti znalosti vhodného rozpouštědla pro daný materiál. Zároveň bylo experimentálně zjištěno, že používaný piezoelektrický modul není schopen produkovat dostatečný objem aerosolu z čistého DCM. Experimentálně bylo zjištěno, že DCM není dostatečně mísitelný s vodou, aby bylo možné použít vodný roztok DCM jako zdroj aerosolu. Aceton tvořil aerosol v dostačující míře, proto jeho mísení s vodou nebylo zvažováno. Vzhledem k tomu, že použití samotného acetonu jako leptadla v navrhovaném zařízení by značně omezovalo množství materiálů, které by bylo možné v zařízení leptat, byl vytvořen roztok acetonu a DCM. Používaný piezoelektrický modul byl schopen vytvořit dostatečně velký objem aerosolu tohoto roztoku.

Při samotném experimentu byl piezoelektrický modul umístěn na dno exsikátoru. Následně byl exsikátor naplněn roztokem tak, aby hladina sahala nad úroveň modulu. Modul byl následně zapnut, v důsledku čehož začal produkovat aerosol, viz. následující obrázek.



Obrázek 24 - Aerosol roztoku acetonu a DCM použitý při experimentu

. Testované vzorky byly zavěšeny na tenký provázek a manuálně vkládány do vytvořeného aerosolového mraku v exsikátoru, kde byly drženy po dobu 1 až 9 minut. Vzorky byly kontrolovány po minutových intervalech. Pakliže bylo zjištěno, že povrch vzorku není dostatečně vyhlazen, vzorek byl opět ponořen do aerosolu. Po dosažení přijatelných výsledků u všech vzorků byly vzorky opláchnuty proudem vody a ponechány na klidném místě po dobu jednoho týdne z důvodu jejich vysušení. Následně byly vzorky zdokumentovány.



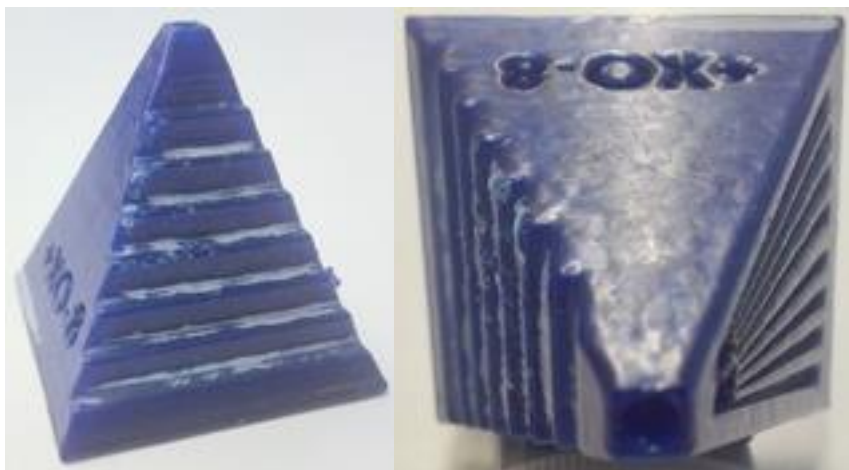
Obrázek 25 - Vzorek z PLA po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM

Na obrázku výše je zobrazen vzorek z PLA z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 9 minutách leptání. Je patrné, že došlo ke značnému vyhlazení tiskových vrstev na povrchu vzorku. Povrch vzorku je velmi lesklý. Odstín barvy vzorku se nezměnil.



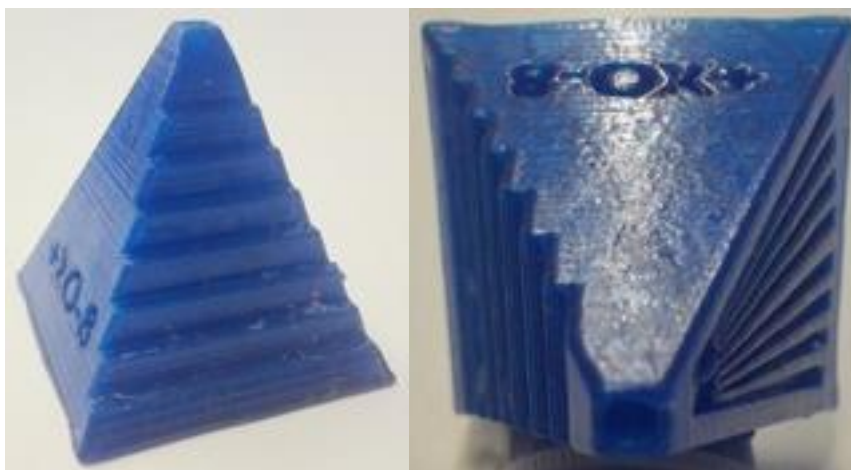
Obrázek 26 - Vzorek z ABS po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM

Obrázek výše zobrazuje vzorek z ABS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 1 minutě leptání. Většina viditelných tiskových vrstev byla úplně vyhlazena, povrch vzorku se stal velmi lesklým. Byla plně zachována původní geometrie vzorku.



Obrázek 27 - Vzorek z PETG po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM

Výše zobrazený obrázek zobrazuje vzorek z PETG z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 3 minutách leptání. Tiskové vrstvy na povrchu vzorku byly kompletně vyhlazeny, povrch vzorku se stal velmi lesklým. Geometrie vzorku byla plně zachována. Na mnoha místech vzorku však došlo k úplné ztrátě barvy.



Obrázek 28 - Vzorek z SBS po leptání v aerosolu roztoku acetonu a DCM

Na posledním obrázku výše je vzorek z SBS z boku (vlevo) a pod úhlem proti světlu (vpravo) po 2 minutách leptání. I u tohoto vzorku je patrné výrazné vyhlazení tiskových vrstev a zvýšení lesklosti povrchu vzorku za plného zachování původní geometrie vzorku.

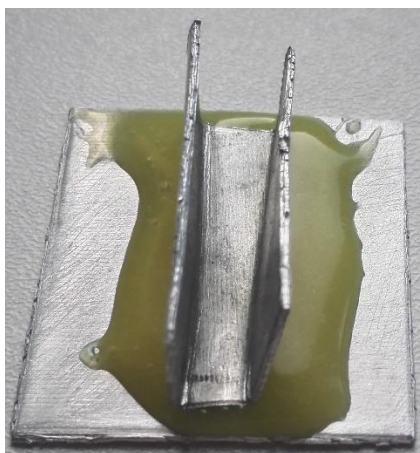
2.1.6 Test vlivu acetonu a DCM na epoxidový spoj

Poslední provedený experiment testoval použitelnost epoxidu na bázi bisfenolu A jako jednoho z konstrukčních materiálů v navrhovaném zařízení. Vzhledem k tomu, že na základě teoretické rešerše (viz. tabulka 10) byl zjištěn vedlejší vliv acetonu na epoxid, zatímco ostatní používaná rozpouštědla jej ovlivňovat neměla – a také vzhledem k množství různých druhů epoxidů na trhu – byl proveden tento experiment, který měl za úkol data získaná teoretickou rešerší ověřit či vyvrátit. Epoxid na bázi bisfenolu A byl vybrán z toho důvodu, že tento epoxid je nejnáze dostupný, a tedy vhodný pro použití v navrhovaném zařízení.

Pro experiment byly použity dva vzorky, každý vzorek sestával ze dvou kusů hliníkového plechu (simulujícího hlavní konstrukční materiál navrhovaného zařízení), které k sobě byly přilepeny tlustou vrstvou epoxidu.

První vytvořený vzorek byl umístěn do nádoby naplněné acetonem, druhý vzorek byl umístěn do nádoby naplněné DCM. Oba vzorky byly ponořeny v chemikálii po dobu jednoho týdne. Poté byly vzorky vyjmuty a zdokumentovány.

Na obrázku níže je zobrazen vzorek hliníku spojeného epoxidem, který byl použit pro tento experiment.



Obrázek 29 – Ukázka vzorku hliníku spojeného epoxidem



Obrázek 30 - Vzorek epoxidového spoje po vystavení acetonu

Na obrázku výše je zobrazen vzorek epoxidového spoje po týdnu působení acetonu. Došlo k nabobtnání spoje, což mělo za následek výrazné oslabení spoje. Dříve pevně spojené kusy hliníku bylo velmi snadné oddělit. Epoxid změnil svou strukturu, namísto dříve pevného materiálu se stal měkkým a gumovým. Došlo ke změně barvy epoxidu. Uvnitř epoxidu se objevilo velké množství vzduchových bublin. Hliník vlivu acetonu odolal beze změny.



Obrázek 31 - Vzorek epoxidového spoje po vystavení DCM

Obrázek výše zobrazuje vzorek epoxidového spoje po týdnu působení DCM. Došlo k naprostému rozpadnutí epoxidového spoje, značná část objemu epoxidu zmizela, zbylý epoxid tvořil malou krustu na dně nádoby. Hliník vlivu DCM odolal beze změny.

2.1.7 Zhodnocení výsledků laboratorních experimentů

Ze všech experimentů užívajících chemické leptání parami je patrné, že ačkoliv většina vzorků reagovala s vybranými rozpouštědly, k naleptání povrchu vzorků v takové míře, aby došlo k vyhlazení tiskových vrstev, je potřeba velké množství času. To by nejen ztížilo obsluhu navrhovaného zařízení, neboť by bylo nutné proces leptání sledovat a včas ukončit, ale zároveň to umožňuje parám reagovat se vzorkem dostatečně dlouhou dobu na to, aby rozrušily vnitřní strukturu vzorku a tím ovlivnily jeho geometrii.

V případě užití par chloroformu pro leptání vzorků bylo zjištěno, že chloroform nemá po dni působení výrazný efekt na vzorky z PLA a PETG. V ani jednom případě nedošlo k vyhlazení tiskových vrstev. V případě PLA došlo k degradaci barvy vzorku, u PETG pak došlo k deformaci vzorku. Vzorky z ABS a SBS byly po dni působení par silně naleptány, v případě ABS došlo k vyhlazení tiskových vrstev, avšak geometrie vzorku byla silně poškozena, v případě SBS došlo ke zničení vzorku.

Páry roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1 měly po dni působení pouze nepatrný vliv na vzorek z PLA, u nějž způsobily převážně degradaci barvy. V případě PETG bylo viditelné mírné vyhlazení tiskových vrstev. U vzorků z ABS a SBS sice došlo k vyhlazení tiskových vrstev, ale geometrie obou vzorků byla zásadním způsobem narušena.

Páry DCM měly na výtisky podobný vliv. Po dvou dnech působení nebyla pozorováno vyhlazení povrchu vzorku z PLA, pouze degradace jeho barvy a k výrazné deformaci jeho spodní části. Povrch vzorku z PETG byl lehce vyhlazen. Vzorky z ABS a SBS vydržely kontakt s parami po jeden den. V případě ABS bylo vyhlazování tiskových vrstev více patrné, avšak začalo docházet i k silnému zaoblování ostrých hran vzorku. Povrch vzorku z SBS byl dni leptání lehce vyhlazený. V průběhu dalšího dne leptání však došlo ke zničení obou vzorků.

Páry THF testované na vzorcích z PLA a PETG po dvou dnech nepatrně vyhladily povrch obou vzorků. Spodní část vzorku z PLA však byla lehce zkroucena a opět nastala degradace jeho barvy, u vzorku z PETG se zase objevila delaminace tiskových vrstev na několika místech.

Páry acetonu byly nakonec testovány na vzorcích z ABS a SBS po dobu dvou dní. V případě vzorku z ABS bylo patrné drobné vyhlazení povrchu vzorku po jednom dni, v průběhu druhého dne však došlo k zásadnímu poškození původní geometrie vzorku. V případě SBS byl vzorek částečně vyhlazen po dvou dnech. Došlo však opět k velké delaminaci tiskových vrstev.

Z experimentů s procesem chemického leptání parami lze tedy vyvodit ten závěr, že proces je nepoužitelný v navrhovaném zařízení z důvodu jeho neefektivity a nespolehlivosti, dlouhé doby trvání, náročnosti na odhad doby potřebné k leptání a riziku úplného zničení leptaného vzorku.

V dalším experimentu byla testována použitelnost chemického leptání aerosolem roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1 namísto parami. Proces byl velmi rychlý, v případě ABS zabral 1 minutu, u SBS 2 minuty, u PETG 3 minuty, a nakonec u PLA 9 minut.

Navíc u všech testovaných vzorků došlo k téměř naprostému či naprostému vyhlazení tiskových vrstev bez vedlejších efektů ve formě ztráty geometrie vzorku či delaminace. Pouze v případě PETG došlo ke ztrátě barvy vzorku na několika místech. Tyto výsledky činí proces chemického leptání aerosolem nejvhodnějším kandidátem pro užití v navrhovaném zařízení.

Poslední provedený experiment testoval odolnost epoxidového spoje vůči acetonu a DCM. Jednalo se o epoxid na bázi bisfenolu A, jímž byly spojeny dva kousky hliníkového plechu a ponořeny do chemikálií po dobu jednoho týdne. V obou případech spoj selhal, v případě acetonu došlo k jeho nabobtnání a změně barvy a pevnosti, v případě DCM pak došlo k rozpuštění části epoxidu a rozpadnutí celého spoje. Užitý hliníkový plech obě chemikálie vydržel. Epoxid tedy není možné použít v navrhovaném zařízení.

2.2 Návrh zařízení

Vzhledem k výsledkům laboratorního experimentu (viz. 2.1.7) bude pro navrhované zařízení použito aerosolu z organických rozpouštědel namísto jejich par. Nastínění principu této technologie je popsáno v podkapitole 1.3.2. S ohledem na cenu a opracovatelnost materiálů při sestavování navrhovaného zařízení bylo rozhodnuto, že hlavní část zařízení bude vytvořena z hliníkových profilů a hliníkových plechů, skla a nylonových držáků. S ohledem na tabulku chemické kompatibility byl THF a chloroform vyřazen jako pracovní rozpouštědlo, neboť tato rozpouštědla nejsou kompatibilní s hliníkem. Aerosol tedy bude vytvářen z roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1, jehož vliv na leptané výtisky byl ověřen v laboratorním experimentu (viz. 2.1.5).

2.2.1 Mechanická část zařízení

Navrhované zařízení má tvar kvádrů o celkových rozměrech cca 75x37x34 cm. Sestává ze 3 zón, které jsou navzájem propojeny pro zajištění průchodu aerosolu.

První zóna je umístěna ve vrchní části zařízení. Na její vrchní straně je umístěno víko uchycené dvojicí pantů k vnějším plechům zařízení. Dále se na něm nacházejí 4 ventilátory zajišťující cirkulaci vzduchu v zařízení. Víko je dále opatřené rukojetí pro jeho odklopení a plechovým trychtýřem umístěným po zavření víka přímo nad piezoelektrickým modulem. Piezoelektrický modul při své činnosti mimo aerosolu produkuje i velké množství větších kapiček, které by mohly způsobovat nerovnoměrné leptání povrchu výtisku. Plechový trychtýř má za úkol zabránit větším kapkám v opuštění první zóny tím, že je zastaví a nasměruje zpět do rezervoáru s pracovní chemikálií, umístěné uprostřed zóny. Právě v tomto rezervoáru se nachází piezoelektrický modul. Zóna obsahuje vnitřní sadu plechů, které jsou svařené dohromady a přichycené ke kostře zařízení tvořené hliníkovými profily nylonovými držáky. Tyto vnitřní plechy by měly zamezovat průniku aerosolu mimo první zónu. Dno první zóny je zhotoveno z perforovaného plechu, který umožňuje volný průchod vytvořeného aerosolu do leptací zóny zařízení umístěné níže. Výška první zóny je cca 22 centimetru a byla zvolena tak, aby i v případě ucpání otvorů vedoucích do leptací zóny zařízení nedošlo k „přetečení“ aerosolu mimo zařízení přes horní okraj. Navíc pro lepší kontrolu pohybu aerosolu po zařízení lze užít ventilátorů na víku zařízení.

Na obrázku níže je zvýrazněné umístění první zóny v zařízení při pohledu z horního nahledu.



Obrázek 32 - Umístění první zóny v navrhovaném zařízení

Druhou zónou je leptací zóna. Její rám sestává z hliníkových profilů spojených dohromady hliníkovými úhelníky. Tři stěny jsou zhotoveny z celistvého kusu plechu, který tvoří stěny celého zařízení, čímž zároveň slouží jako propojení všech tří zón zařízení. Zároveň však plechy plní funkci těsnění leptací zóny. Jak bylo zjištěno v laboratorním experimentu a teoretické rešerši, není možné pro utěsnění zařízení užívat epoxidu ani jiných snadno dostupných těsnících materiálů. Proto je těsnění tvořené pouhým mechanickým kontaktem hliníkových profilů s hliníkovým plechem. Vzhledem k velikosti jednotlivých aerosolových kapiček by nemělo skrze tento spoj docházet k úniku aerosolu mimo zařízení. Čtvrtá stěna leptací zóny sestává ze skleněných dvířek připojených ke kostře zařízení pantem s vytisknutým odstupem, který umožňuje dvířkám plně přilehnout na rám zařízení, čímž by mělo dojít k vytvoření neprůchozí bariery mezi aerosolem a vnějším prostředím. Zároveň dvířka obsahují držák pro jejich otevření. Vzhledem k malým rozměrům pantu a držadla nebylo možné do skleněných dvířek vrtat montážní otvory, proto je pant i držadlo připevněno k dvířkám lepidlem. Lepidlo by se však za žádných okolností nemělo dostat do styku s pracovními chemikáliemi, proto na něj nejsou tvořeny speciální nároky. Leptací zóna umožňuje leptání výtisků o maximální velikosti 190x190x190 mm. Výtisk je pro leptání umístěn do leptací zóny na podstavec, který jej odděluje od dna leptací zóny, neboť na dně této zóny dochází ke kondenzaci aerosolu. Víko i dno leptací zóny jsou sdílené s první a třetí zónou.

Na následujícím obrázku je zvýrazněné umístění druhé zóny v zařízení při pohledu z předního nahladu.



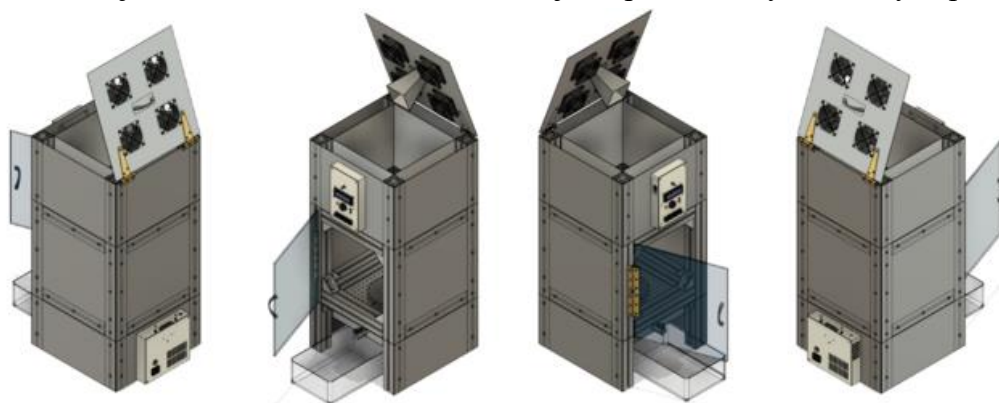
Obrázek 33 - Umístění druhé zóny v navrhovaném zařízení

Třetí zónou je odpadní zóna. Opět je její kostra vymezena hliníkovými profily o velikosti cca 17,5 cm, aby se pod odpadní zásobník umístěný na spodní části zařízení mohla vložit miska, do níž se odpadní chemikálie mohou odpouštět. Odpadní zásobník je spojen s leptací zónou skrze plech, který v sobě má menší množství malých děr umožňujících snadný odtok kondenzujících chemikálií do odpadního zásobníku. Tyto díry však nedovolují snadný průstup aerosolu do tohoto odpadního zásobníku. Samotný odpadní zásobník je sestaven z pětice plechů, které po svaření vytvoří nádobu se zkoseným dnem. V nejnižším bodě zásobníku je umístěn nerezový ventil, který v případě naplnění odpadního zásobníku umožňuje jeho vypuštění. Odpadní zásobník je k vnější kostře připevněn nylonovými držáky. Na obrázku níže je zvýrazněné umístění třetí zóny v zařízení při pohledu z předního nahladu.



Obrázek 34 - Umístění třetí zóny v navrhovaném zařízení

Při návrhu zařízení bylo dbáno na jednoduchost konstrukce, proto je nutné svaření pouze dvou dílů v celém zařízení. Ostatní plechy a profily jsou spojeny šrouby a maticemi. Plechy tvořící těsnění leptací zóny pokrývají 3 ze 4 stěn celého zařízení, čímž poskytují další izolační vrstvu pro první a třetí zónu. Na čelní straně první zóny je umístěn vytisknutý box s ovládacími prvky a řídicí elektronikou zařízení. Výkonová elektronika a konektory jsou umístěny naopak na zadní straně zařízení ve vytisknutém krytu připevněném na plechu třetí zóny. Při návrhu byla brána v úvahu omezená životnost použitých piezoelektrických modulů a ventilátorů, proto jsou všechny tyto součásti odnímatelné. Konektory tedy slouží k rychlé výměně ventilátorů či k rychlému odejmutí piezoelektrického modulu. Průchozí design zařízení zároveň umožňuje snadné čištění zařízení. Po dokončení leptání stačí odpojit a vyjmout piezoelektrický modul, který může být opláchnut vodou. Do zařízení je možné nalít vodu a tím ho očistit od zbytkových chemikálií. Poté stačí odpustit odpadní vodu z odpadního zásobníku. Následující obrázek ukazuje navrhované zařízení včetně vnějších plechů a krytů z různých pohledů.



Obrázek 35 – Navrhované zařízení z různých pohledů

Kompletní model navrhovaného zařízení je k dispozici na příloženém CD.

2.2.2 Elektronická část zařízení

Elektronická část zařízení sestává z elektronických modulů pro usnadnění výroby zařízení. Tyto moduly jsou spolu s dalšími součástkami propojeny dohromady podle schématu zapojení uvedeného v příloze 1.

Zařízení je EURO konektorem připojeno k síti. Celé zařízení se zapíná přepínačem umožňujícím po sepnutí průchod střídavého napětí do spínaného zdroje napětí. Tento zdroj poskytuje stejnosměrný výstup 12 V a 4,2 A. Zdroj napájí řídicí elektroniku, ventilátory (4 o oděru do 250 mA pro každý) a DC/DC měnič o maximálním výstupním proudu 6 A. Tento měnič zvedá hodnotu napětí z 12 V na 24 V, což je napětí potřebné pro napájení piezoelektrických modulů tvořících aerosol. Každý modul má spotřebu cca 1 A. Návrh počítá se čtveřicí napájecích konektorů pro ventilátory a dvojicí napájecích konektorů pro piezoelektrické moduly, tedy v zařízení je možné použít až dva moduly najednou. Spínaný zdroj dále napájí oranžovou LED indikující zapnutí zařízení

a modul Arduino Nano, který slouží jako řídicí elektronika zařízení. K tomuto modulu je připojen LCD displej o 16 znacích na každém z 2 řádků. Jas displeje je nastavován trimrem. Zařízení umožňuje skrze displej a 4 tlačítka interakci s uživatelem. Tlačítka jsou zapojena přes odporový žebřík na jediný vstupní pin Arduina. Řídicí elektronika dále ovládá výkon ventilátorů skrze unipolární tranzistor ovládaný pulzně šířkovou modulací. Další unipolární tranzistor ovládá piezoelektrické moduly. Bipolární tranzistory pak slouží ke snížení proudové zátěže řídicí elektroniky a k ovládní indikačních LED. Zařízení dále obsahuje piezoelektrický akustický měnič, který poskytuje akustickou indikaci stisku tlačítka uživatelem.

2.2.3 Softwarová část zařízení

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole (viz. 2.2.2), zařízení bude ovládáno modulem Arduino Nano. Arduino má své vlastní vývojové prostředí Arduino IDE, kde se programuje kód v jazyce C++. Program řídicí navrhované zařízení dovoluje interakci mezi zařízením a uživatelem a na základě vstupu uživatele ovládá komponenty zařízení. Zobrazuje na LCD displeji menu, které umožňuje uživateli volbu jednoho z přednastavených leptacích profilů, přechod do manuálního ovládní zařízení a do nastavení zařízení, kde je možné leptací profily upravit. V případě výběru přednastaveného profilu uživatel vybere, z jakého materiálu je leptaný výtisk zhotoven. Po potvrzení volby je uživateli umožněno pozměnit přednastavený čas potřebný pro leptání daného plastu. Po započítí procesu leptání dojde ke spuštění piezoelektrických modulů a spuštění ventilátorů na slabý výkon. Uživatel je o zbývající době potřebné k leptání výtisku informován odpočtem na displeji zařízení. Zároveň po celou dobu zapnutí piezoelektrických modulů je chod zařízení indikován svícením červené LED na panelu zařízení. Na konci procesu leptání dojde k vypnutí piezoelektrických modulů a sepnutí ventilátorů na plný výkon, což způsobí ustání tvorby aerosolu a jeho rychlejší kondenzaci na dně zařízení. Tato část procesu je uživateli indikována blikající červenou LED. Na displeji zařízení se objeví nový odpočet, informující uživatele o tom, kdy bude dokončeno čištění zařízení a bude tedy bezpečné vyjmout leptaný výtisk ze zařízení. To je zároveň indikováno zhasnutím červené LED a rozsvícením zelené LED. V menu manuálního ovládní může uživatel skrze menu ovládat zapnutí a vypnutí piezoelektrických modulů a výkon ventilátorů. V nastavení zařízení může uživatel zapnout či vypnout akustické hlášení stisku tlačítek, upravit dobu leptání pro každý z přednastavených profilů, upravit dobu čištění zařízení po dokončení procesu leptání, či může vrátit zařízení do výchozího nastavení. Všechna nastavení jsou ukládána v EEPROM, takže dochází k jejich uchování i po vypnutí zařízení. V příloze 2 je uveden celý zdrojový kód ovládní zařízení.

3. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za úkol vytvořit návrh zařízení, které by bylo použitelné pro vyhlazování 3D výtisků FDM 3D tiskáren z různých materiálů.

Byly vybrány 4 snadno dostupné tiskové materiály – PLA, ABS, PETG, SBS. Výtisky zhotovené z těchto materiálů by měly být v navrhovaném zařízení vyhladitelné. Vzhledem k principu fungování zařízení založeném na chemickém leptání materiálu, z něhož je 3D výtisk zhotoven, byla na základě chemické rezistivity daných materiálů vybrána čtyři rozpouštědla, která jsou relativně dostupná, ale zároveň nejsou vysoce toxická – aceton, dichlormethan, chloroform a tetrahydrofuran.

Na základě rešerše byly nalezeny dva hlavní způsoby chemického vyhlazování 3D výtisků, a to vyhlazování v parách a vyhlazování aerosolem. Obě metody mají z hlediska návrhu vyhlazovacího zařízení své výhody a nevýhody. Rozhodujícím faktorem však byla jejich reálná použitelnost pro snadné a rychlé vyhlazování tiskových vrstev na povrchu výtisků.

Pro ověření použitelnosti obou metod byly provedeny laboratorní experimenty, které testovaly vliv par jednotlivých rozpouštědel na výtisky. Bylo zjištěno, že proces leptání chemickými parami není vhodný pro použití v navrhovaném zařízení, neboť nevedl ke konzistentním výsledkům. Především u PLA a PETG vedlo leptání v parách různých rozpouštědel k minimálnímu úspěchu. Ve většině případů došlo k navýšení lesklosti povrchu, avšak tiskové vrstvy zahlazeny nebyly. V některých případech došlo ke zkroucení či nabobtnání vzorků. U vzorků z ABS a SBS došlo vždy k vyhlazení povrchu, avšak vždy došlo k extrémnímu narušení tiskové geometrie. Navíc ve všech případech trval proces leptání parami mnoho hodin.

Proto byl proveden experiment s aerosolem roztoku acetonu a DCM v poměru 1:1. Aceton i DCM měly dohromady vliv na všechny vzorky, proto byl zvolen roztok těchto chemikálií. Navíc produkce aerosolu DCM užitým piezoelektrickým modulem byla velmi nízká a jeho mísitelnost s vodou byla omezená. Proto byl vytvořen roztok, který dokáže produkovat dostatečný objem aerosolu a má vliv na všechny testované plastové materiály. Při laboratorním experimentu byly vzorky ze všech čtyř materiálů vkládány do koncentrovaného aerosolu tohoto roztoku. Po vyjmutí vzorků z aerosolu byl jejich povrch zbaven viditelných tiskových vrstev. Navíc proces leptání trval pouze 1-9 minut. Proto byl proces leptání aerosolem vybrán jako proces použitelný v navrhovaném zařízení.

Poslední provedený laboratorní experiment testoval použitelnost epoxidu jako tmelícího materiálu v navrhovaném zařízení. Dlouhé vystavení vzorku vlivu acetonu a DCM vedly ke zničení testovacích vzorků. Proto není epoxid použitelný pro utěsnění spojů v navrhovaném zařízení.

Odpověď na hypotézu z úvodu této práce tedy zní: metoda chemického leptání v parách není použitelná z důvodu dlouhé doby potřebné k naleptání výtisků a nekonzistentních výsledků leptání, naopak metoda chemického leptání v aerosolu je

z důvodu nízké doby potřebné k naleptání výtisků a vlivu na všechny testované materiály použitelná a doporučená.

Teoretický návrh zařízení popsany v této bakalářské práci zohledňuje chemickou kompatibilitu vybraných rozpouštědel s materiály, z nichž by mělo být zařízení zhotoveno. Byl proveden návrh zařízení s ohledem na jednoduchost jeho konstrukce a použití. S ohledem na nízkou cenu a snadnou opracovatelnost byl jako hlavní konstrukční materiál vybrán hliník, přesněji hliníkové profily a hliníkové plechy. Vzhledem k nekompatibilitě hliníku s THF a chloroformem a s ohledem na dobré výsledky laboratorního experimentu testujícího leptání aerosolem roztoku acetonu a DCM bylo rozhodnuto, že THF a chloroform nebudou jako leptací chemikálie v navrhovaném zařízení používány.

Navrhované zařízení funguje na principu chemického leptání aerosolem. Sestává ze tří částí. V horní části zařízení dochází k tvorbě aerosolu. Aerosol vlivem gravitace a mírného prouděním vzduchu způsobeného ventilátory ve víku zařízení klesá do střední části zařízení, kde dochází k leptání výtisku. Po dokončení leptání jsou ventilátory sepnuty na plný výkon, čímž urychlují kondenzaci aerosolu na dně leptací zóny zařízení. Odtud chemikálie odtéká do odpadní zóny zařízení umístěné pod leptací zónou. Po dokončení činnosti je možné zařízení snadno vyčistit vodou. V případě poruchy ventilátorů či piezoelektrických modulů tvořících aerosol vlivem dlouhodobého působení chemikálií je možné porouchaný komponent snadno vyměnit.

Zároveň byl popsán návrh elektronické a softwarové části zařízení postavené okolo modulu Arduino Nano. Interakce mezi uživatelem a zařízením je zajištěna rozhraním sestávajícím z tlačítek a LCD displeje. Software zařízení dovoluje automatické vyhlazování výtisků z různých plastových materiálů výběrem jednoho z přednastavených leptacích profilů, které je možné v nastavení zařízení přenastavit, nebo manuální ovládání piezoelektrických modulů a ventilátorů.

LITERATURA

- [1] LONJON, Capucine. The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. *Sculpteo* [online]. Villejuif: Sculpteo, 2009 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [2] KODAMA, Hideo. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments* [online]. 1981, **52**(11), 1770-1773 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.1063/1.1136492. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1136492>
- [3] *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. 1986. United States. 4575330. Uděleno Aug. 8, 1984. Zapsáno Mar. 11, 1986.
- [4] *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. 1989. United States. 5121329. Uděleno Jun. 9, 1992. Zapsáno Oct. 30, 1989.
- [5] *Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning*. 1990. United States. 5155324. Uděleno Oct. 13, 1992. Zapsáno Nov. 9, 1990.
- [6] KRUTH, J-P., P. MERCELIS, J. VAN VAERENBERGH, L. FROYEN a M. ROMBOOTS. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2005, **11**(1), 26-36 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.1108/13552540510573365. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552540510573365>
- [7] GREGURIĆ, Leo. Let There Be LEDs: What is a DLP 3D Printer? – Simply Explained. *All3DP* [online]. Germany: All3DP, 2014 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/>
- [8] WINICK, Erin. 3D printing's 30 year history and why it's popular now. *Medium* [online]. San Francisco: A Medium Corporation, 2018 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://medium.com/@erinwinick/3d-printings-30-year-history-and-why-it-is-popular-now-5200ab21a7ed>
- [9] LEE, Jian-Yuan, Jia AN a Chee CHUA. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today* [online]. 2017, **7**, 120-133 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.004. ISSN 23529407. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352940717300173>
- [10] CLINTON, R. NASA Additive Manufacturing Initiatives: In Space Manufacturing and Rocket Engines. *NASA Technical Reports Server* [online].

- Hampton: NASA, 2018 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170009098.pdf>
- [11] ANAKHU, Peter, Christian BOLU, Abiodun ABIOYE a Joseph AZETA. Fused Deposition Modeling Printed Patterns for Sand Casting in a Nigerian Foundry: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research* [online]. eSearch India Publications, 2018, **13**(7), 5113-5119 [cit. 2018-12-10]. ISSN 0973-4562. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/324601411_Fused_Deposition_Modeling_Printed_Patterns_for_Sand_Casting_in_a_Nigerian_Foundry_A_Review
- [12] PALERMO, Elizabeth. What is Selective Laser Sintering?. *Live Science* [online]. Ambury: Future plc, 2004 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- [13] VAN NOORT, Richard. The future of dental devices is digital. *Dental Materials* [online]. 2012, **28**(1), 3-12 [cit. 2018-12-10]. DOI: 10.1016/j.dental.2011.10.014. ISSN 01095641. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564111008955>
- [14] DAVOUDINEJAD, Ali, Danilo QUAGLIOTTI, David PEDERSEN, José YAGÜE-FABRA, Lucia DIAZ, Jose ALBAJEZ a Guido TOSELLO. GEOMETRIC AND FEATURE SIZE DESIGN EFFECT ON VAT PHOTOPOLYMERIZATION MICRO ADDITIVELY MANUFACTURED SURFACE FEATURES. *Conference: ASPE and euspen Summer Topical Meeting*, [online]. Berkeley, 2018, , 5 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327388017_GEOMETRIC_AND_FEATURE_SIZE_DESIGN_EFFECT_ON_VAT_PHOTOPOLYMERIZATION_MICRO_ADDITIVELY_MANUFACTURED_SURFACE_FEATURES?_sg=WJIArfw5EIogUpYq04i1cgJxWpsJnCmSHjfyCWDi3dtURvmNO8OfKEFIqLVjTHZt9thArwGBzg
- [15] ZUZA, Mikolas. EVERYTHING ABOUT NOZZLES WITH A DIFFERENT DIAMETER. *Prusa Printers* [online]. Praha: Prusa3D, 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter/>
- [16] *Vapor smoothing surface finishing system*. 2008. United States. 8075300 B2. Uděleno Dec. 13, 2011. Zapsáno Jun. 30, 2008.
- [17] *Smoothing method for layer deposition modeling*. 2003. United States. 8123999 B2. Uděleno Oct. 30, 2003. Zapsáno Apr. 4, 2003.

- [18] ARMSTRONG, Courtney. Post processing for FDM printed parts. *3D Hubs* [online]. 3D Hubs, 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts>
- [19] SINGH, Rupinder, Sunpreet SINGH, Iqwinder SINGH, Francesco FABBROCINO a Fernando FRATERNALI. Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, **111**, 228-234 [cit. 2018-12-02]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.062. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816325239>
- [20] FDM BEST PRACTICE: SOLVENT SMOOTHING. *AdvancedTek* [online]. St. Paul: AdvanceTek, 2016 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: https://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2016/08/Best_Practice_-_FDM_Solvent_Smoothing_-_11-14.pdf
- [21] Safety Data Sheet: PolySmooth™. *Polymaker* [online]. Shanghai: Polymaker, 2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: https://polymaker.com/Downloads/SDS/PolySmooth_SDS_V4.pdf
- [22] Polysher™: Operation Manual. *Polymaker* [online]. Shanghai: Polymaker, 2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <https://polymaker.com/Downloads/Operation-Manuals/Polysher-Operation-Manual.pdf>
- [23] Investment Casting with PolyCast™. *Polymaker* [online]. Shanghai: Polymaker, 2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: https://polymaker.com/Downloads/Application_Note/PolyCast_Application_Note_V1.pdf
- [24] 20mm 113 KHz Ultrasonic Humidifier Atomization Ceramic Discs Mist Maker Fogger Transducer Film. *PZT* [online]. Dongguan City: PZT Electronic Ceramic Co.,Ltd, 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.piezoelements.com/mist-generation/piezo-microporous-atomizer/20mm-113-khz-ultrasonic-humidifier.html>
- [25] REDWOOD, M. Transient Performance of a Piezoelectric Transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1961, **33**(4), 527-536 [cit. 2018-12-04]. DOI: 10.1121/1.1908709. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1908709>
- [26] Model 241CT, CST, CV Operating Instructions. *SONAER Ultrasonics* [online]. New York: Sonaer USA, b.r. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: http://www.sonozap.com/241CT_CST_CV.PDF
- [27] PARASHAR, Kaushik. How do ultrasonic humidifiers work?. In: *Quora: A place to share knowledge and better understand the world.* [online]. Mountain

- View: Quora, 2018 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.quora.com/How-do-ultrasonic-humidifiers-work>
- [28] Learn About Common Uses Of Piezo Transducer: Piezoelectric Transducer For Common Applications. *Piezo-ceramics | Ultrasonic Cleaners - Hanzhou Ultrasonic* [online]. Nanjing: Nanjing Hanzhou Technologie CO., LTD, 2015 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.piezo-ultrasonic.com/piezoelectric-transducer-applications-a006.html>
- [29] Things you should know about ABS. *Tom's 3D printing guides and reviews* [online]. Thomas Sanladerer, 2018 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://toms3d.org/2018/02/02/things-know-abs/>
- [30] *Common Chemistry: A CAS Solution* [online]. Washington: American Chemical Society, 2015 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.commonchemistry.org/>
- [31] Things you should know about PLA. *Tom's 3D printing guides and reviews* [online]. Thomas Sanladerer, 2018 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://toms3d.org/2018/02/02/things-know-pla/>
- [32] *3D PRINTER FILAMENTS FINDER: Types, Prices, Reviews, Print Settings and much more* [online]. Belgium: Si2W SPRL, 2015 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.filaments.directory/en>
- [33] Ultimate 3D Printing Materials Guide. *Simplify3D* [online]. Cincinnati: Simplify3D, 2018 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [34] PARKER, Alan. Protic-dipolar aprotic solvent effects on rates of bimolecular reactions. *Chemical Reviews* [online]. 1969, **69**(1), 1-32 [cit. 2018-12-05]. DOI: 10.1021/cr60257a001. ISSN 0009-2665. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr60257a001>
- [35] SATO, Shuichi, Daiki GONDO, Takayuki WADA, Shinji KANEHASHI a Kazukiyo NAGAI. Effects of various liquid organic solvents on solvent-induced crystallization of amorphous poly(lactic acid) film. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2013, **129**(3), 1607-1617 [cit. 2018-12-05]. DOI: 10.1002/app.38833. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.38833>
- [36] *Sigma-Aldrich* [online]. Darmstadt: Merck KGaA, 2018 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/>
- [37] SHER, Davide. HOW TOXIC ARE ABS & PLA FUMES? 3DSAFETY.ORG EXAMINES VOCS. *3D Printing Industry: The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. 3D Printing Industry, 2017 [cit.

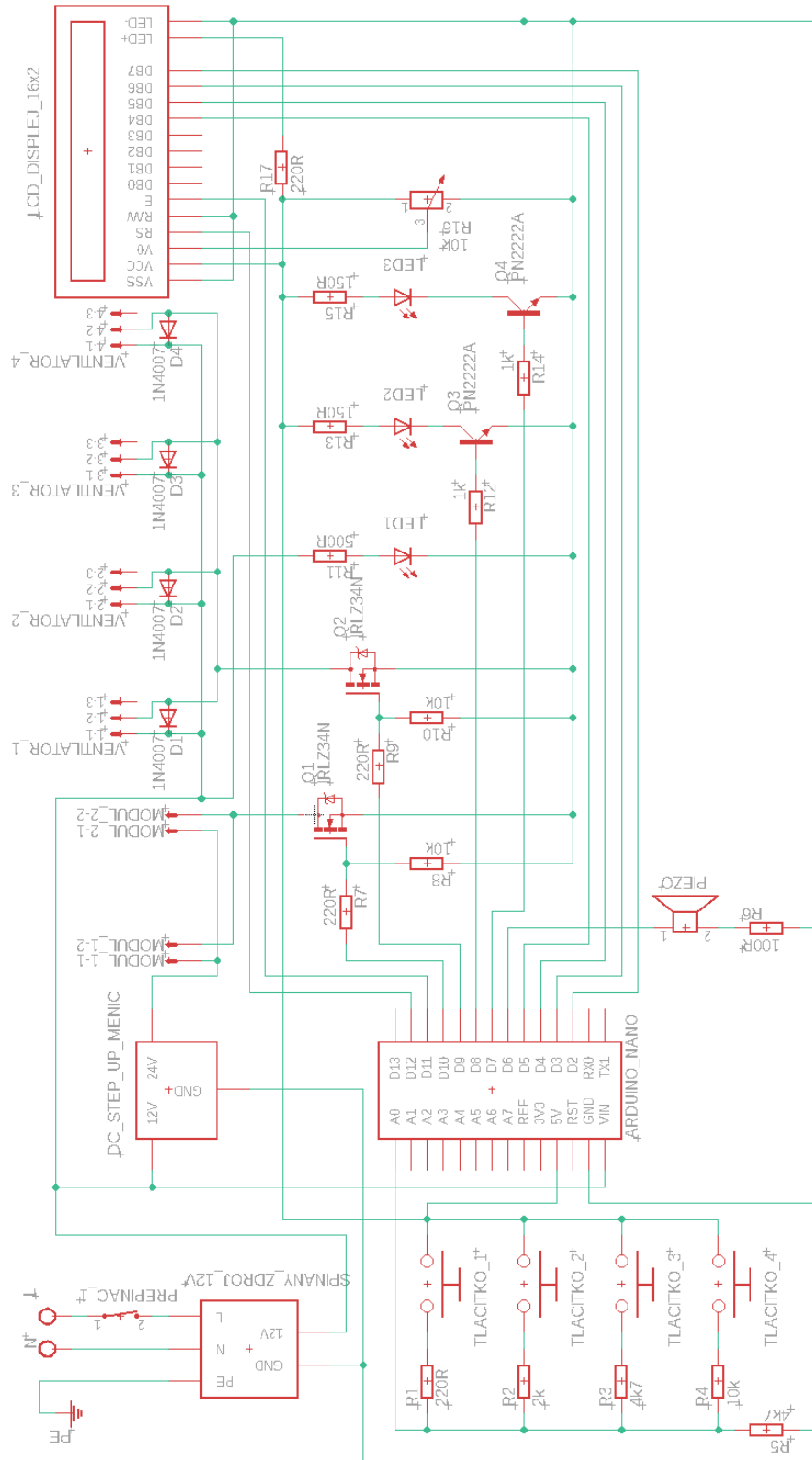
- 2018-12-05]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/toxic-abs-pla-fumes-3dsafety-org-inquires-vocs-60796/>
- [38] Chemical Resistance Chart of Plastics (at Curbell Plastics). *Curbell Plastics* [online]. Orchard Park: Curbell Plastics, 2018 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Chemical-Resistance-Chart>
- [39] Things you should know about PETG. *Tom's 3D printing guides and reviews* [online]. Thomas Sanladerer, 2018 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://toms3d.org/2018/02/05/things-know-petg/>
- [40] Chemical Compatibility Guide. *Sevier Lab: Biochemistry • Cell Biology • Genetics* [online]. ITHACA: CORNELL UNIVERSITY, 2012 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://sevierlab.vet.cornell.edu/resources/Research-Links-Page/3-General-Lab-Resources/Chemical-Resistance-Chart-Detail.pdf>
- [41] SBS Filament (English). *CraftBot.nl: Balans* [online]. Rotterdam: Balans, 2015 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.craftbot.nl/2016/04/26/sbs-filament-english/>
- [42] Компания "Filamentarno!": производитель расходных материалов для 3D-принтеров [online]. Moskva: Gorkun TS, b.r. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <http://www.filamentarno.ru/>
- [43] *Materialpro 3D* [online]. Brno: Materialpro3d.cz, 2018 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>
- [44] MATERIÁLOVÝ SLOVNÍK. *Materialpro 3D* [online]. Brno: Materialpro3d.cz, 2018 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [45] Chemical Resistance Chart. *Quick Cut: Gasket & Rubber Corporation* [online]. Lancaster: Quick Cut Gasket & Rubber Corporation, 2014 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <http://www.quickcutgasket.com/pdf/Chemical-Resistance-Chart.pdf>
- [46] Compound Summary: Acetone. *PubChem* [online]. Bethesda: National Institutes of Health, 2004 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/180>
- [47] Compound Summary: Methylene Chloride. *PubChem* [online]. Bethesda: National Institutes of Health, 2004 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6344>
- [48] Compound Summary: Tetrahydrofuran. *PubChem* [online]. Bethesda: National Institutes of Health, 2004 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8028>

- [49] Compound Summary: Chloroform. *PubChem* [online]. Bethesda: National Institutes of Health, 2004 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6212>
- [50] Polyurethane - Chemical Resistance. *Engineering ToolBox* [online]. Engineering ToolBox, 2001 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/polyurethane-chemical-resistance-d_1878.html
- [51] PEEK Chemical Compatibility. *CPLabSafety: Making Science Green* [online]. CP Lab Safety, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.calpaclab.com/polyetherether-ketone-peek-chemical-compatibility-chart/>
- [52] Chemical Resistance of Styrene Copolymers. *OKW Enclosures* [online]. Bridgeville: OKW Enclosures, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.okwenclosures.com/en/media/e1c71e00-cf5c-11e2-896a-0050568225d7>
- [53] General Chemical Resistance Guide. *WARCO BILTRITE* [online]. Orange: West American Rubber Company, 2007 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.warco.com/pdf/Rubber-Elastomer-Chemical-Resistance-Guide-by-TLARGI-and-WARCO-BILTRITE.pdf>
- [54] BT50 and BT30 chemical resistance chart at 20°C. *Stuart Equipment* [online]. Stone, Staffordshire: Cole-Parmer, 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: http://www.stuart-equipment.com/adminimages/T13_001A_BT50_BT30_chemical_resistance.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Schéma zapojení elektroniky	I
Příloha 2 - Zdrojový kód řídicí elektroniky	II

Příloha 1 - Schéma zapojení elektroniky



Příloha 2 - Zdrojový kód řídicí elektroniky

```
//Vyhlažovací box na 3D výtisky FDM 3D tiskáren - řídicí software
```

```
//Načtení knihoven
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>
```

```
//Výchozí nastavení času leptání v sekundách, pro ověření lze užít 1. testovací kód - nutno používat pouze násobky 10
const int EEPROM_PLA_vychozi = 540; //Doba leptání výtisků z PLA (10-2540)
const int EEPROM_ABS_vychozi = 60; //Doba leptání výtisků z ABS (10-2540)
const int EEPROM_PETG_vychozi = 180; //Doba leptání výtisků z PETG (10-2540)
const int EEPROM_SBS_vychozi = 120; //Doba leptání výtisků z SBS (10-2540)
const int EEPROM_cisteni_vychozi = 30; //Doba čištění komory ventilátorů po dokončení leptání (10-2540)
```

```
//Nastavení síly ventilátorů a nejnižší PWM hodnoty, při níž se spustí
const int hodnota_ventilace = 5; //Síla ventilátorů při čištění zařízení (0-5)
const int hodnota_vent_chod = 1; //Síla ventilátorů při leptání (0-5)
const int nejnizsi_hodnota_vent = 50; //Hodnota, při níž dojde k roztočení ventilátorů na sílu 1 (0-255)
```

```
//Vychozi nastaveni zvuku
const boolean zvuk_vychozi = true; //Výchozí nastavení zvuku na zapnut/vypnut
const int tlacitko_zvuk = 20; //Doba trvání zvuku po stisku tlačítka v ms
const int tlacitko_frekvence = 1000; //Frekvence zvuku tlačítek v Hz
```

```
//Přiřazení analogových hodnot jednotlivým tlačítkům, pro kalibraci lze užít 2. testovací kód
const float tlacitko_zpet_hodn = 727.0; //Hodnota odpovídající stisku tlačítka "zpět" (0-1023)
const float tlacitko_nahoru_hodn = 1003.0; //Hodnota odpovídající stisku tlačítka "nahoru" (0-1023)
const float tlacitko_dolu_hodn = 513.0; //Hodnota odpovídající stisku tlačítka "dolů" (0-1023)
const float tlacitko_ok_hodn = 330.0; //Hodnota odpovídající stisku tlačítka "ok" (0-1023)
const float max_hodn_vychozi = 100.0; //Nastavuje mez, pod jejíž hodnotu dochází k detekci log. 0
```

```
//Nastavení přesnosti tlačítek
```

```
const float tlacitko_citlivost = 15.0; //Rozsah hodnot okolo tlačítka, po který je tlačítko považováno za stisklé
const int hodn_dvojklik = 150; //Velikost meze pro detekci dvojkliku, musí být menší než vzdálenost dvou hodnot tlačítek
```

```
//Přiřazení pinů vstupům/výstupům
const int tlacitka_pin = A0; //Pin připojený na odporový žebřík s tlačítky
const int piezo_pin = 6; //Pin připojený k akustickému piezoměnič
const int led_zelena_pin = 7; //Pin připojený k zelené indikační LED
const int led_cervena_pin = 8; //Pin připojený k červené indikační LED
const int moduly_pin = 9; //Pin připojený k tranzistoru ovládajícímu piezoelektrické moduly
const int ventilatory_pin = 10; //Pin připojený k tranzistoru ovládajícímu ventilátory
```

```
//Přiřazení pinů displeji
const int rs = 12; //Pin připojený k RS
const int en = 11; //Pin připojený k E
const int d4 = 5; //Pin připojený k D4
const int d5 = 4; //Pin připojený k D5
const int d6 = 3; //Pin připojený k D6
const int d7 = 2; //Pin připojený k D7
```

```
//Nastavení adres v EEPROM
const int PLA_adresa = 1; //Lokace dat o PLA v EEPROM (0-1023)
const int ABS_adresa = 2; //Lokace dat o ABS v EEPROM (0-1023)
const int PETG_adresa = 3; //Lokace dat o PETG v EEPROM (0-1023)
const int SBS_adresa = 4; //Lokace dat o SBS v EEPROM (0-1023)
const int cisteni_adresa = 5; //Lokace dat o čištění v EEPROM (0-1023)
const int zvuk_adresa = 6; //Lokace dat o nastavení zvuku v EEPROM (0-1023)
```

```
//Inicializace ostatních proměnných
const int casovac_sekunda = 1000;
unsigned long casovac = 0;
unsigned long vychozi_cas = 0;
unsigned long pocitadlo_led = 0;
boolean tlacitko_zpet = false;
boolean tlacitko_nahoru = false;
boolean tlacitko_dolu = false;
boolean tlacitko_ok = false;
boolean ochrana_proti_dvojkliku = false;
boolean ochrana_min = false;
boolean zobrazeni_vent = false;
```

```

boolean proces_zapnut = false;
boolean priznak_leptani = false;
boolean moduly_zapnuty = false;
boolean zvuk_po_stisku = true;
boolean zobrazeni_eeeprom = true;
boolean zobrazeni_info = true;
boolean zvuk_povolen = true;
int hlavni_menu = 1;
int manualni_menu = 0;
int nastaveni_menu = 0;
int profily_menu = 0;
int odpocet_menu = 0;
int hl_min = 0;
int man_min = 0;
int nast_min = 0;
int prof_min = 0;
int odp_min = 0;
int manualni_ventilator = 0;
int man_vent_min = 0;
int EEPROM_PLA = 0;
int EEPROM_ABS = 0;
int EEPROM_PETG = 0;
int EEPROM_SBS = 0;
int EEPROM_cisteni = 0;
int PLA_min = 0;
int ABS_min = 0;
int PETG_min = 0;
int SBS_min = 0;
int cisteni_min = 0;
int ventilator_ovladani = 0;
int doba_leptani = 0;
int leptani_min = 0;
int odpocet_leptani = 0;
int odpocet_min = 0;
int odpocet_ventilace = 0;
int ventilace_min = 0;
int soucasna_hodn_tlacitka = 0;
int predesla_hodn_tlacitka = 0;

//Inicializace displeje
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

//Struktura výběrového symbolu na displeji
byte symbol[8] {
    B00000,
    B01000,
    B00100,
    B00010,
    B00010,
    B00100,
    B01000,
    B00000};

//Procedura provedená po startu zařízení
void setup() {
    //Nastavení pinů na vstupy/výstupy
    pinMode(tlacitka_pin, INPUT);
    pinMode(piezo_pin, OUTPUT);

```

```

    pinMode(led_zelena_pin, OUTPUT);
    pinMode(led_cervena_pin, OUTPUT);
    pinMode(moduly_pin, OUTPUT);
    pinMode(ventilatory_pin, OUTPUT);
    //Aktivace LCD displeje
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.createChar(1, symbol);
    //Načtení dat z EEPROM
    EEPROM_PLA = EEPROM.read(PLA_adresa) * 10;
    EEPROM_ABS = EEPROM.read(ABS_adresa) * 10;
    EEPROM_PETG = EEPROM.read(PETG_adresa) *
    10;
    EEPROM_SBS = EEPROM.read(SBS_adresa) * 10;
    EEPROM_cisteni = EEPROM.read(cisteni_adresa) *
    10;
    //Vyhodnocení zapnutí/vypnutí zvuku dle nastavení v
    EEPROM
    if (EEPROM.read(zvuk_adresa) == 0) {
        zvuk_povolen = false;}
    else {
        zvuk_povolen = true;}
    //Započítání počítání času pro časovač
    vychozi_cas = millis();

    //Pro účely testování
    /*
    Serial.begin(9600);
    */
}

//Hlavní smyčka programu
void loop() {
    //Přečte aktuální hodnotu vstupu z tlačítka
    soucasna_hodn_tlacitka = analogRead(tlacitka_pin);
    //Pokud došlo k změně hodnoty stisknutého tlačítka
    if (soucasna_hodn_tlacitka > (predesla_hodn_tlacitka
    + hodn_dvojklik) || soucasna_hodn_tlacitka < (pre-
    desla_hodn_tlacitka - hodn_dvojklik)) {
        //Ochrana proti dvojkliku, první část
        if (ochrana_proti_dvojkliku == false) {
            ochrana_proti_dvojkliku = true;
            //Pakliže je zapnut zvuk, přehraje se tón stisknu-
            tého tlačítka
            if (zvuk_povolen == true && zvuk_po_stisku ==
            true) {
                tone(piezo_pin, tlacitko_frekvence, tla-
                citko_zvuk);
                zvuk_po_stisku = false;}
            else {
                noTone(piezo_pin);
                zvuk_po_stisku = false;}
            //Zjišťuje, které tlačítko bylo stisknuto
            if (soucasna_hodn_tlacitka <= (tlacitko_zpet_hodn
            + tlacitko_citlivost) && soucasna_hodn_tlacitka >=
            (tlacitko_zpet_hodn - tlacitko_citlivost)) {
                tlacitko_zpet = true;
                tlacitko_nahoru = false;
                tlacitko_dolu = false;

```

```

    tlacitko_ok = false;}
    else if (soucasna_hodn_tlacitka <= (tlacitko_na-
horu_hodn + tlacitko_citlivost) && soucasna_hodn_tla-
citka >= (tlacitko_nahoru_hodn - tlacitko_citlivost)) {
        tlacitko_zpet = false;
        tlacitko_nahoru = true;
        tlacitko_dolu = false;
        tlacitko_ok = false;}
    else if (soucasna_hodn_tlacitka <= (tla-
citko_dolu_hodn + tlacitko_citlivost) && sou-
casna_hodn_tlacitka >= (tlacitko_dolu_hodn - tla-
citko_citlivost)) {
        tlacitko_zpet = false;
        tlacitko_nahoru = false;
        tlacitko_dolu = true;
        tlacitko_ok = false;}
    else if (soucasna_hodn_tlacitka <= (tla-
citko_ok_hodn + tlacitko_citlivost) && sou-
casna_hodn_tlacitka >= (tlacitko_ok_hodn - tla-
citko_citlivost)) {
        tlacitko_zpet = false;
        tlacitko_nahoru = false;
        tlacitko_dolu = false;
        tlacitko_ok = true;}
    //Ochrana proti opětovnému zvuku tlačítka po jeho
odmáčknutí
    else if (soucasna_hodn_tlacitka <= max_hodn_vy-
chozi) {
        zvuk_po_stisku = true;} } }
    //Pokud nedošlo k identifikaci stisknutého tlačítka,
nastaví všechna tlačítka na vypnutá
    else {
        tlacitko_zpet = false;
        tlacitko_nahoru = false;
        tlacitko_dolu = false;
        tlacitko_ok = false;}

//Posun ve struktuře hlavního menu
if (hlavni_menu != 0) {
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "nahoru"
    if (tlacitko_nahoru == true) {
        //Posun v menu nahoru
        if (hlavni_menu > 1) hlavni_menu--;}
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "dolů"
    if (tlacitko_dolu == true) {
        //Posun v menu dolů
        if (hlavni_menu < 3) hlavni_menu++;}
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "zpět"
    if (tlacitko_zpet == true) {
        //Vrácení se na hlavní obrazovku
        hlavni_menu = 1;}
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "ok"
    if (tlacitko_ok == true) {
        //Pokud je vybráno "Vybrat profil"
        if (hlavni_menu == 1) {
            hlavni_menu = 0;
            profily_menu = 1;}
        //Pokud je vybráno "Manuální ovládání"
        else if (hlavni_menu == 2) {
            hlavni_menu = 0;
            manualni_menu = 1;}
        //Pokud je vybráno "Nastavení"
        else if (hlavni_menu == 3) {
            hlavni_menu = 0;
            nastaveni_menu = 1;} } }
    //Posun ve struktuře menu manuálního ovládání
    else if (manualni_menu != 0) {
        //Pokud bylo stisknuto tlačítko "nahoru"
        if (tlacitko_nahoru == true) {
            //Posun v menu manuálního ovládání
            if (manualni_menu == 4) {
                manualni_menu = 1;}
            //Posun v podmenu ovládání modulů
            else if (manualni_menu == 3) {
                manualni_menu = 2;}
            //Navyšování hodnoty síly ventilátorů
            else if (manualni_menu == 5) {
                if (manualni_ventilator < 5) {
                    manualni_ventilator++;} } }
        //Pokud bylo stisknuto tlačítko "dolů"
        if (tlacitko_dolu == true) {
            //Posun v menu manuálního ovládání
            if (manualni_menu == 1) {manualni_menu = 4;}
            //Posun v podmenu ovládání modulů
            else if (manualni_menu == 2) {manualni_menu =
3;}
            //Snižování hodnoty síly ventilátorů
            else if (manualni_menu == 5) {
                if (manualni_ventilator > 0) {
                    manualni_ventilator--;} } }
        //Pokud bylo stisknuto tlačítko "zpět"
        if (tlacitko_zpet == true) {
            //Návrat do hlavního menu z menu manuálního
ovládání
            if (manualni_menu == 1 || manualni_menu == 4) {
                hlavni_menu = 1;
                manualni_menu = 0;} }
        //Pokud bylo stisknuto tlačítko "ok"
        if (tlacitko_ok == true) {
            //Pokud je vybráno "Piezo moduly"
            if (manualni_menu == 1) {
                //Vybrání podmenu zapnuty/vypnuty v závislosti
na aktuálním stavu modulů
                if (moduly_zapnuty == true) {
                    manualni_menu = 3;}
                else if (moduly_zapnuty == false) {
                    manualni_menu = 2;} }
            //Pokud je vybráno "Vypnuty" v podmenu piezo
modulů
            else if (manualni_menu == 2) {
                moduly_zapnuty = false;
                manualni_menu = 1;}
            //Pokud je vybráno "Zapnuty" v podmenu piezo
modulů
            else if (manualni_menu == 3) {
                moduly_zapnuty = true;

```

```

    manualni_menu = 1;}
//Pokud je vybráno "Ventilátory"
else if (manualni_menu == 4) {
    manualni_menu = 5;
    zobrazeni_vent = true;}
//Pokud je nastavována hodnota síly ventilátorů
else if (manualni_menu == 5) {
    ventilator_ovladani = manualni_ventilator;
    manualni_menu = 4;} }
//Pohyb ve struktuře menu nastavení
else if (nastaveni_menu != 0) {
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "nahoru"
if (tlacitko_nahoru == true) {
//Posun v menu nastavení nahoru
if (nastaveni_menu == 15) {
    nastaveni_menu = 13;}
else if (nastaveni_menu == 13) {
    nastaveni_menu = 4;}
else if (nastaveni_menu == 4) {
    nastaveni_menu = 1;}
//Posun v podmenu výchozího nastavení nahoru
else if (nastaveni_menu == 17) {
    nastaveni_menu = 16;}
//Posun v podmenu nastavení profilu nahoru
else if (nastaveni_menu == 11) {
    nastaveni_menu = 9;}
else if (nastaveni_menu == 9) {
    nastaveni_menu = 7;}
else if (nastaveni_menu == 7) {
    nastaveni_menu = 5;}
//Posun v podmenu zvuku nahoru
else if (nastaveni_menu == 3) {
    nastaveni_menu = 2;}
//Zvyšování hodnot při nastavování EEPROM
else if (nastaveni_menu == 6 && EEPROM_PLA <
2540) {
    EEPROM_PLA = EEPROM_PLA + 10;}
else if (nastaveni_menu == 8 && EEPROM_ABS <
2540) {
    EEPROM_ABS = EEPROM_ABS + 10;}
else if (nastaveni_menu == 10 &&
EEPROM_PETG < 2540) {
    EEPROM_PETG = EEPROM_PETG + 10;}
else if (nastaveni_menu == 12 && EEPROM_SBS
< 2540) {
    EEPROM_SBS = EEPROM_SBS + 10;}
else if (nastaveni_menu == 14 && EEPROM_cis-
teni < 2540) {
    EEPROM_cisteni = EEPROM_cisteni + 10;}}
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "dolů"
if (tlacitko_dolu == true) {
//Posun v menu nastavení dolů
if (nastaveni_menu == 1) {
    nastaveni_menu = 4;}
else if (nastaveni_menu == 4) {
    nastaveni_menu = 13;}
else if (nastaveni_menu == 13) {
    nastaveni_menu = 15;}

//Posun v podmenu zvuku dolů
else if (nastaveni_menu == 2) {
    nastaveni_menu = 3;}
//Posun v podmenu nastavení profilu dolů
else if (nastaveni_menu == 5) {
    nastaveni_menu = 7;}
else if (nastaveni_menu == 7) {
    nastaveni_menu = 9;}
else if (nastaveni_menu == 9) {
    nastaveni_menu = 11;}
//Posun v podmenu výchozího nastavení dolů
else if (nastaveni_menu == 16) {
    nastaveni_menu = 17;}
//Snižování hodnot při nastavování EEPROM
else if (nastaveni_menu == 6 && EEPROM_PLA >
10) {
    EEPROM_PLA = EEPROM_PLA - 10;}
else if (nastaveni_menu == 8 && EEPROM_ABS >
10) {
    EEPROM_ABS = EEPROM_ABS - 10;}
else if (nastaveni_menu == 10 &&
EEPROM_PETG > 10) {
    EEPROM_PETG = EEPROM_PETG - 10;}
else if (nastaveni_menu == 12 && EEPROM_SBS
> 10) {
    EEPROM_SBS = EEPROM_SBS - 10;}
else if (nastaveni_menu == 14 && EEPROM_cis-
teni > 10) {
    EEPROM_cisteni = EEPROM_cisteni - 10;}}
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "zpět"
if (tlacitko_zpet == true) {
//Návrat do hlavního menu z menu nastavení
if (nastaveni_menu == 1 || nastaveni_menu == 4 ||
nastaveni_menu == 13 || nastaveni_menu == 15) {
    hlavni_menu = 1;
    nastaveni_menu = 0;}
//Návrat do menu nastavení z podmenu nastavení
profilu
else if (nastaveni_menu == 5 || nastaveni_menu
== 7 || nastaveni_menu == 9 || nastaveni_menu == 11)
{
    nastaveni_menu = 1;}
//Návrat do menu nastavení z obrazovky "Obnovit
výchozí hotovo"
else if (nastaveni_menu == 18) {
    nastaveni_menu = 1;}}
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "ok"
if (tlacitko_ok == true) {
//Pokud je vybráno "Zvuk"
if (nastaveni_menu == 1) {
//Vybrání podmenu zapnut/vypnut v závislosti na
aktuálním nastavení zvuku
if (zvuk_povolen == true) {
    nastaveni_menu = 2;}
else if (zvuk_povolen == false) {
    nastaveni_menu = 3;}}
//Pokud je v podmenu zvuku vybráno "Zapnut"
else if (nastaveni_menu == 2) {

```

```

zvuk_povolen = true;
EEPROM.update(zvuk_adresa, 1);
tone(piezo_pin, tlacitko_frekvence, tla-
citko_zvuk);
nastaveni_menu = 1;}
//Pokud je v podmenu zvuku vybráno "Vypnut"
else if (nastaveni_menu == 3) {
EEPROM.update(zvuk_adresa, 0);
zvuk_povolen = false;
nastaveni_menu = 1;}
//Pokud je vybráno "Nastavení profilu"
else if (nastaveni_menu == 4) {
nastaveni_menu = 5;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu vybráno
"PLA"
else if (nastaveni_menu == 5) {
EEPROM_PLA = EEPROM.read(PLA_adresa) *
10;
zobrazeni_eeprom = true;
nastaveni_menu = 6;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu nastavena
hodnota "PLA"
else if (nastaveni_menu == 6) {
EEPROM.update(PLA_adresa,
(EEPROM_PLA/10));
nastaveni_menu = 5;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu vybráno
"ABS"
else if (nastaveni_menu == 7) {
EEPROM_ABS = EEPROM.read(ABS_adresa) *
10;
zobrazeni_eeprom = true;
nastaveni_menu = 8;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu nastavena
hodnota "ABS"
else if (nastaveni_menu == 8) {
EEPROM.update(ABS_adresa,
(EEPROM_ABS/10));
nastaveni_menu = 7;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu vybráno
"PETG"
else if (nastaveni_menu == 9) {
EEPROM_PETG = EEPROM.read(PETG_ad-
resa) * 10;
zobrazeni_eeprom = true;
nastaveni_menu = 10;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu nastavena
hodnota "PETG"
else if (nastaveni_menu == 10) {
EEPROM.update(PETG_adresa,
(EEPROM_PETG/10));
nastaveni_menu = 9;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu vybráno
"SBS"
else if (nastaveni_menu == 11) {
EEPROM_SBS = EEPROM.read(SBS_adresa) *
10;
zobrazeni_eeprom = true;
nastaveni_menu = 12;}
//Pokud je v podmenu nastavení profilu nastavena
hodnota "SBS"
else if (nastaveni_menu == 12) {
EEPROM.update(SBS_adresa,
(EEPROM_SBS/10));
nastaveni_menu = 11;}
//Pokud je vybráno "Nastavení čištění"
else if (nastaveni_menu == 13) {
EEPROM_cisteni = EEPROM.read(cisteni_ad-
resa) * 10;
zobrazeni_eeprom = true;
nastaveni_menu = 14;}
//Pokud je nastavena hodnota čištění
else if (nastaveni_menu == 14) {
EEPROM.update(cisteni_adresa, (EEPROM_cis-
teni/10));
nastaveni_menu = 13;}
//Pokud je vybráno "Obnovit výchozí"
else if (nastaveni_menu == 15) {
nastaveni_menu = 16;}
//Pokud je v podmenu výchozího obnovení vy-
bráno "Ne"
else if (nastaveni_menu == 16) {
nastaveni_menu = 15;}
//Pokud je v podmenu výchozího obnovení vy-
bráno "Ano"
else if (nastaveni_menu == 17) {
EEPROM.write(PLA_adresa,
(EEPROM_PLA_vychozi/10));
EEPROM.write(ABS_adresa,
(EEPROM_ABS_vychozi/10));
EEPROM.write(PETG_adresa,
(EEPROM_PETG_vychozi/10));
EEPROM.write(SBS_adresa,
(EEPROM_SBS_vychozi/10));
EEPROM.write(cisteni_adresa, (EEPROM_cis-
teni_vychozi/10));
//Interpretace výchozího nastavení zvuku z hla-
vičky programu
if (zvuk_vychozi == true) {
EEPROM.write(zvuk_adresa, 1);
tone(piezo_pin, tlacitko_frekvence, tla-
citko_zvuk);
zvuk_povolen = true;}
else if (zvuk_vychozi == false) {
EEPROM.write(zvuk_adresa, 0);
zvuk_povolen = false;}
nastaveni_menu = 18;}}
//Posun ve struktuře menu výběru profilu
else if (profily_menu != 0) {
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "nahoru"
if (tlacitko_nahoru == true) {
//Posun v menu nahoru
if (profily_menu > 1) {
profily_menu--;} }
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "dolů"
if (tlacitko_dolu == true) {

```



```

//Posun v menu dolů
if (profily_menu < 4) {
    profily_menu++;}
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "zpět"
if (tlacitko_zpet == true) {
    //Návrat do hlavního menu z menu výběru profilu
    hlavni_menu = 1;
    profily_menu = 0;}
//Pokud bylo stisknuto tlačítko "ok"
if (tlacitko_ok == true) {
    //Pokud byl zvolen profil PLA
    if (profily_menu == 1) {
        doba_leptani = EEPROM.read(PLA_adresa) *
10;
        zobrazeni_eeprom = true;
        profily_menu = 0;
        odpocet_menu = 1;}
    //Pokud byl zvolen profil ABS
    else if (profily_menu == 2) {
        doba_leptani = EEPROM.read(ABS_adresa) *
10;
        zobrazeni_eeprom = true;
        profily_menu = 0;
        odpocet_menu = 1;}
    //Pokud byl zvolen profil PETG
    else if (profily_menu == 3) {
        doba_leptani = EEPROM.read(PETG_adresa) *
10;
        zobrazeni_eeprom = true;
        profily_menu = 0;
        odpocet_menu = 1;}
    //Pokud byl zvolen profil SBS
    else if (profily_menu == 4) {
        doba_leptani = EEPROM.read(SBS_adresa) *
10;
        zobrazeni_eeprom = true;
        profily_menu = 0;
        odpocet_menu = 1;} }
//Pohyb ve struktuře obrazovek odpočítávání při
chodu zařízení
else if (odpocet_menu != 0) {
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "nahoru"
    if (tlacitko_nahoru == true) {
        //Pohyb v nabídce přerušení procesu na "NE"
        if (odpocet_menu == 4) {
            odpocet_menu = 3;}
        //Manuální nastavování doby leptání načtené z pa-
měti zařízení (navyšování)
        else if (odpocet_menu == 1 && doba_leptani <
2540) {
            doba_leptani = doba_leptani + 10;} }
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "dolů"
    if (tlacitko_dolu == true) {
        //Pohyb v nabídce přerušení procesu na "ANO"
        if (odpocet_menu == 3) {
            odpocet_menu = 4;}
        //Manuální nastavování doby leptání načtené z pa-
měti zařízení (snižování)
        else if (odpocet_menu == 1 && doba_leptani > 10)
{
            doba_leptani = doba_leptani - 10;} }
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "zpět"
    if (tlacitko_zpet == true) {
        //Návrat do menu výběru profilu z "Doladění času"
        if (odpocet_menu == 1) {
            doba_leptani = 0;
            profily_menu = 1;
            odpocet_menu = 0;
            odpocet_ventilace = 0;}
        //Posun do nabídky "Přerušit proces"
        else if (odpocet_menu == 2) {
            odpocet_menu = 3;}
        //Návrat do hlavního menu po dokončení procesu
leptání
        else if (odpocet_menu == 5) {
            hlavni_menu = 1;
            odpocet_menu = 0;} }
    //Pokud bylo stisknuto tlačítko "ok"
    if (tlacitko_ok == true) {
        //Potvrzení dostavení času a přesun na obrazovku
"Zbývající čas" z obrazovky "Doladění času"
        if (odpocet_menu == 1) {
            odpocet_leptani = doba_leptani;
            doba_leptani = 0;
            odpocet_menu = 2;
            zobrazeni_info = true;
            proces_zapnut = true;
            odpocet_ventilace = EEPROM.read(cistení_ad-
resa) * 10;}
        //Návrat na obrazovku "Zbývající čas" při volně
"Ne" na obrazovce "Přerušení procesu"
        else if (odpocet_menu == 3) {
            odpocet_menu = 2;}
        //Přerušení procesu leptání při volbě "Ano" na ob-
razovce "Přerušení procesu", započítí čištění komory
        else if (odpocet_menu == 4) {
            zobrazeni_info = true;
            odpocet_leptani = 0;
            odpocet_menu = 6;}
        //Návrat do hlavního menu po dokončení procesu
leptání
        else if (odpocet_menu == 5) {
            hlavni_menu = 1;
            odpocet_menu = 0;} } }
    //Znovu vykreslení zobrazené obrazovky při změně
aktuální obrazovky vůči předešlé
    if (hlavni_menu != hl_min || manualni_menu !=
man_min || nastaveni_menu != nast_min || pro-
fily_menu != prof_min || odpocet_menu != odp_min) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nast-
aveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);}
    //Pokud jsou ventilátory manuálně ovládané, vykreslí
se aktuálně nastavovaná hodnota
    if (manualni_menu == 5) {

```



```

    if (manualni_ventilator != man_vent_min || zobrazeni_vent == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(manualni_ventilator);
        lcd.print("/5");
        zobrazeni_vent = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty času leptání PLA v EEPROM, vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (nastaveni_menu == 6) {
    if (EEPROM_PLA != PLA_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(EEPROM_PLA);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty času leptání ABS v EEPROM, vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (nastaveni_menu == 8) {
    if (EEPROM_ABS != ABS_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(EEPROM_ABS);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty času leptání PETG v EEPROM, vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (nastaveni_menu == 10) {
    if (EEPROM_PETG != PETG_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(EEPROM_PETG);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty času leptání SBS v EEPROM, vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (nastaveni_menu == 12) {
    if (EEPROM_SBS != SBS_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(EEPROM_SBS);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty času čištění zařízení po dokončení leptání v EEPROM, vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (nastaveni_menu == 14) {
    if (EEPROM_cisteni != cisteni_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(EEPROM_cisteni);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Pokud dochází k nastavování hodnoty doladění leptacího času na obrazovce "Doladění času", vykreslí se aktuálně nastavovaná hodnota
if (odpocet_menu == 1) {
    if (doba_leptani != leptani_min || zobrazeni_eeprom == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.write(1);
        lcd.print(" ");
        lcd.print(doba_leptani);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_eeprom = false;} }

//Aktualizuje displej v průběhu činnosti zařízení pro zobrazení odpočtu zbývajících času leptání
if (odpocet_menu == 2) {
    if (odpocet_leptani != odpocet_min || zobrazeni_info == true) {
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
        lcd.setCursor(0, 1);
        //Vycentrování čísel do středu displeje nezávisle na počtu číslic
        if (odpocet_leptani >= 100) {
            lcd.print(" ");}
        else if (odpocet_leptani < 100) {
            lcd.print(" ");}
        lcd.print(odpocet_leptani);
        lcd.print(" s");
        zobrazeni_info = false;} }

//Aktualizuje displej v průběhu čištění zařízení pro zobrazení odpočtu zbývajících času čištění
if (odpocet_menu == 6) {
    if (odpocet_ventilace != ventilace_min || zobrazeni_info == true) {

```

```

    Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);
    lcd.setCursor(0, 1);
    //Vycentrování čísel do středu displeje nezávisle na počtu číslic
    if (odpocet_ventilace >= 100) {
        lcd.print(" ");
    }
    else if (odpocet_ventilace < 100) {
        lcd.print(" ");
    }
    lcd.print(odpocet_ventilace);
    lcd.print(" s");
    zobrazeni_info = false; }

//Nastavení probíhajících procesů při chodu zařízení
if (proces_zapnut == true) {
    manualni_ventilator = 0;
    //Pokud je aktivní odpočet času leptání, jsou aktivovány moduly
    if (odpocet_leptani > 0) {
        moduly_zapnuty = true;
        ventilator_ovladani = hodnota_vent_chod;
        priznak_leptani = true; }
    //Pokud čas leptání dosáhl konečné hodnoty (0 sekund), jsou vypnuty moduly a zobrazí se obrazovka "Probíhá čištění"
    else if (odpocet_leptani == 0 && priznak_leptani == true) {
        moduly_zapnuty = false;
        odpocet_menu = 6;
        zobrazeni_info = true;
        priznak_leptani = false;}
    //Pokud bylo leptání dokončeno, ale je aktivní čištění zařízení, zesílí se ventilátory
    if (odpocet_ventilace > 0 && odpocet_leptani == 0) {
        ventilator_ovladani = hodnota_ventilace;}
    //Pokud čas čištění i čas leptání dosáhl konečné hodnoty (0 sekund), vypne ventilátory, proces a zobrazí obrazovku "Proces byl dokončen"
    else if (odpocet_ventilace == 0 && odpocet_leptani == 0) {
        ventilator_ovladani = 0;
        proces_zapnut = false;
        odpocet_menu = 5;
        Displej_info(hlavni_menu, manualni_menu, nastaveni_menu, profily_menu, odpocet_menu);} }
    //Centrální zapnutí/vypnutí piezo modulů
    if (moduly_zapnuty == true) {
        digitalWrite(moduly_pin, HIGH);}
    else if (moduly_zapnuty == false) {
        digitalWrite(moduly_pin, LOW);}
    //Centrální zapnutí/vypnutí ventilátorů
    //Prevence proti pískání/neroztáčení se ventilátorů
    if (ventilator_ovladani == 0) {
        analogWrite(ventilatory_pin, 0);}
    //Aktuální nastavování zapnutí/vypnutí a síly ventilátorů
    else {

```

```

        analogWrite(ventilatory_pin, map(ventilator_ovladani, 1, 5, nejnizsi_hodnota_vent, 255));}
    //Ovládání indikačních LED
    //Pokud jsou moduly zapnuty, červená LED svítí
    if (moduly_zapnuty == true) {
        digitalWrite(led_cervena_pin, HIGH);
        digitalWrite(led_zelena_pin, LOW);}
    //Pokud jsou zapnuty ventilátory, červená LED bliká
    else if (ventilator_ovladani != 0 && moduly_zapnuty == false) {
        if ((pocitadlo_led % 2) != 0) {
            digitalWrite(led_cervena_pin, HIGH);
            digitalWrite(led_zelena_pin, LOW);}
        else if ((pocitadlo_led % 2) == 0) {
            digitalWrite(led_cervena_pin, LOW);
            digitalWrite(led_zelena_pin, LOW);} }
    //Pokud jsou vypnuty moduly i ventilátory, svítí zelená LED
    else if (ventilator_ovladani == 0 && moduly_zapnuty == false){
        digitalWrite(led_cervena_pin, LOW);
        digitalWrite(led_zelena_pin, HIGH);}

    //Ukládání předchozích stavů proměnných pro další vyhodnocení v příštím cyklu
    predesla_hodn_tlacitka = soucasna_hodn_tlacitka;
    hl_min = hlavni_menu;
    man_min = manualni_menu;
    nast_min = nastaveni_menu;
    prof_min = profily_menu;
    odp_min = odpocet_menu;
    man_vent_min = manualni_ventilator;
    PLA_min = EEPROM_PLA;
    ABS_min = EEPROM_ABS;
    PETG_min = EEPROM_PETG;
    SBS_min = EEPROM_SBS;
    cisteni_min = EEPROM_cisteni;
    leptani_min = doba_leptani;
    odpocet_min = odpocet_leptani;
    ventilace_min = odpocet_ventilace;

    //Časovač pro časově závislé operace zařízení
    casovac = millis();
    if ((casovac - vychozi_cas) >= casovac_sekunda) {
        //Odpočet času po sekundách času leptání
        if (odpocet_leptani > 0) {
            odpocet_leptani--;}
        //Odpočet času po sekundách času čištění zařízení
        if (odpocet_leptani == 0 && odpocet_ventilace > 0) {
            odpocet_ventilace--;}
        pocitadlo_led++;
        vychozi_cas = casovac;}

    //Druhá část ochrany proti dvojkliku
    if (ochrana_proti_dvojkliku == true && ochrana_min == true) {
        ochrana_proti_dvojkliku = false;}
    ochrana_min = ochrana_proti_dvojkliku;

```

//1. testovací kód - slouží ke čtení hodnot uložených v EEPROM

```
/*
Serial.print("\n");
Serial.print("Hodnota EEPROM_PLA: ");
Serial.println(EEPROM.read(PLA_adresa) * 10);
Serial.print("Hodnota EEPROM_ABS: ");
Serial.println(EEPROM.read(ABS_adresa) * 10);
Serial.print("Hodnota EEPROM_PETG: ");
Serial.println(EEPROM.read(PETG_adresa) * 10);
Serial.print("Hodnota EEPROM_SBS: ");
Serial.println(EEPROM.read(SBS_adresa) * 10);
Serial.print("\n");
Serial.print("Hodnota EEPROM_cistení: ");
Serial.println(EEPROM.read(cistení_adresa) * 10);
Serial.print("\n");
*/
```

//2. testovací kód - slouží ke kalibraci hodnot a vyhodnocení stisknutého tlačítka

```
/*
Serial.print("Prectena hodnota tlacitka: ");
Serial.println(soucasna_hodn_tlacitka);
Serial.print("Teto hodnote bylo prirazeno tlacitko: ");
if (tlacitko_zpet == true) Serial.println(" Zpet ");
if (tlacitko_nahoru == true) Serial.println(" Nahoru ");
if (tlacitko_dolu == true) Serial.println(" Dolu ");
if (tlacitko_ok == true) Serial.println(" OK ");
Serial.print("\n");
*/
```

//Resetování stavu tlačítek na konci každého cyklu

```
tlacitko_zpet = false;
tlacitko_nahoru = false;
tlacitko_dolu = false;
tlacitko_ok = false;
```

//Zpoždění systému v ms, aby došlo k správnému provedení všech procesů
delay(15);

//Nastavení zpráv jednotlivých obrazovek zobrazovaných na displeji

```
void Displej_info(int obr_hl_menu, int obr_man_menu, int obr_nast, int obr_profily, int obr_odpocet) {
```

```
  lcd.clear();
  //Položky obrazovky hlavního menu
  if (obr_hl_menu == 1 && obr_man_menu == 0 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" HLAVNI MENU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Vybrat profil");
  }
  else if (obr_hl_menu == 2 && obr_man_menu == 0 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
```

```
    lcd.print(" HLAVNI MENU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Manualni ovl.");
  }
  else if (obr_hl_menu == 3 && obr_man_menu == 0 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" HLAVNI MENU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Nastaveni");
  }
  //Položky obrazovky menu manuálního ovládání
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 1 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" MANUALNI OVL. ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Piezo moduly");
  }
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 2 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" PIEZO MODULY ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Vypnutý");
  }
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 3 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" PIEZO MODULY ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Zapnutý");
  }
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 4 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" MANUALNI OVL. ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Ventilatory");
  }
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 5 && obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" VENTILATORY ");
  }
  //Položky obrazovky menu nastavení
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0 && obr_nast == 1 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" NASTAVENI ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Zvuk");
  }
  else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0 && obr_nast == 2 && obr_profily == 0 && obr_odpocet == 0) {
    lcd.print(" ZVUK ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
  }
}
```

```

    lcd.print(" Zapnut");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 3 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print("  ZVUK  ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Vypnut");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 4 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NASTAVENI  ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Profily");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 5 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" PLA");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 6 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PLA  ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 7 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" ABS");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 8 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. ABS  ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 9 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" PETG");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 10 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PETG  ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 11 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" SBS");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 12 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NAST. SBS  ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 13 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NASTAVENI  ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Doba cistení ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 14 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" DOBA CISTENI  ");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 15 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" NASTAVENI  ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Obnovit vych.");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 16 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print("OBNOVIT VYCHOZI");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Ne");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 17 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print("OBNOVIT VYCHOZI");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" Ano");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 18 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print("OBNOVIT VYCHOZI");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" Hotovo  ");}
    //Položky obrazovky výběru profilu
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 1 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" VYBER PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" PLA");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 2 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" VYBER PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" ABS");}
    else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 3 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" VYBER PROFILU ");}

```

```

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" PETG");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 4 && obr_odpocet
== 0) {
    lcd.print(" VYBER PROFILU ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" SBS");}
//Položky obrazovky odpočtu času
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 1) {
    lcd.print(" DOLADENI CASU: ");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 2) {
    lcd.print(" ZBYVAJICI CAS: ");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 3) {
    lcd.print("PRERUSIT PROCES?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" NE");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 4) {
    lcd.print("PRERUSIT PROCES?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.write(1);
    lcd.print(" ANO");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 5) {
    lcd.print(" PROCES BYL ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" DOKONCEN ");}
else if (obr_hl_menu == 0 && obr_man_menu == 0
&& obr_nast == 0 && obr_profily == 0 && obr_odpocet
== 6) {
    lcd.print("PROBIHA CISTENI");}
//V případě, že došlo k nedefinovanému stavu
else {
    lcd.print(" CHYBA! ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("VYPNETE ZARIZENI");} }

```