



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

**3D tiskárna s více tiskovými hlavami pro různé materiály
a kontrolou tisku**

**3D Printer with Multiple Printheads for Different Materials
and Print Control**

Diplomová práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Studijní obor: Audiovizuální technika a zpracování signálů

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Bc. Jaroslav Bartoš

Praha 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bartoš** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **420103**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

3D tiskárna s více tiskovými hlavami pro různé materiály a kontrolou tisku

Název diplomové práce anglicky:

3D Printer with Multiple Printheads for Different Materials and Print Control

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající vlastností a možností současných 3D tiskáren
2. Na základě 1.) a stávající 3D tiskárny navrhnete její úpravu pro tisk pomocí alespoň dvou výměnných tiskových hlav pro tisk různými materiály a kontrolu tisku pomocí kamerového systému. Řiďte se pokyny vedoucího práce.
3. Ověřte funkčnost navrženého a realizovaného zařízení.
4. Zhodnotte dosažené výsledky.
5. Na základě získaných zkušeností navrhnete možné budoucí úpravy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Paškevič, D.: Bakalářská práce. ČVUT FEL, Praha 2013.
- [2] Záhlava, V.: Metodika návrhu plošných spojů. Skriptum ČVUT, Praha 2000.
- [3] Robert B.Reese: Microprocessors from Assembly Language to C Using the PIC18Fxx2, Da Vinci Eng. Press, Higham Massachusetts 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2020**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Dne 24. května 2019 v Praze

.....

podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za čas, který mi věnoval, odborné rady a cenné připomínky v průběhu zpracování této diplomové práce.

Také děkuji všem členům mé rodiny za trpělivost a podporu, kterou mi věnovali při zpracování diplomové práce a po celou dobu studia.

Abstrakt

Práce se zabývá 3D tiskem. Je zde popsána základní problematika 3D tisku a 3D tiskáren. Práce se zaměřuje na FDM tiskárny s více tiskovými hlavami. Další oblastí je problematika vad, které se vyskytují zejména v průběhu 3D tisku a jejich pozorování v termální oblasti pomocí termokamery. Byla vytvořena 3D tiskárna s vyměnitelnými tiskovými hlavami pro více materiálů a napsán ovladač pro termokameru SEEK Thermal Compact, který dokáže s tiskárnou komunikovat přes webové rozhraní Octoprint. Programem ovládaná termální kamera je porovnána s profesionální termokamerou FLUKE Ti25. Tiskárna i program byly úspěšně otestovány.

Klíčová slova: 3D tisk, 3D tiskárna, multimateriálový 3D tisk, extrudér, tiskové vady, termokamera, detekce, zpracování obrazu, Octoprint.

Abstract

This master's thesis is focused on 3D printing and deals with basic issues of 3D printers and 3D printing, specifically FDM type of printers with interchangeable printing heads. Another field of focus are errors, that occur particularly during the process of 3D printing, and observation of these errors in thermal area using thermal camera. For the purpose of this project, a 3D printer with removable and interchangeable heads for various materials was constructed, as well as specialized driver for SEEK Thermal Compact thermal camera, which is able to communicate with the printer via Octoprint web interface. The thermal camera, that is remote-controlled by the program, was compared with a professional thermal camera FLUKE Ti25. Both 3D printer and program were tested and proved functional.

Key words: 3D printing, 3D printer, multimaterial 3D printing, extruder, printing errors, thermal cam, detection, image processing, Octoprint

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie (převzato z [2])</i>	18
<i>Obrázek 2 Schéma SLS tiskárny (převzato z [3])</i>	19
<i>Obrázek 3 Schéma FDM tiskárny</i>	19
<i>Obrázek 4 Maximální úhel přesahu</i>	20
<i>Obrázek 5 Ultimaker S5 (převzato z [9])</i>	21
<i>Obrázek 6 Prusa MK3s (převzato z [10])</i>	21
<i>Obrázek 7 Porovnání bowden a přímého extrudéru (převzato z [18])</i>	23
<i>Obrázek 8 Dual Extruder (převzato z [22])</i>	24
<i>Obrázek 9 Multimateriálový tisk s čistící věží (převzato z [23])</i>	25
<i>Obrázek 10 Filament PLA (převzato z [25])</i>	26
<i>Obrázek 11 Prostředí OctoPrint</i>	29
<i>Obrázek 12 Návrh součástky v Fusion 360</i>	30
<i>Obrázek 13 Úprava součástky ve sliceru</i>	31
<i>Obrázek 14 Pracovní postup při návrhu pro 3D tisk</i>	31
<i>Obrázek 15 Posun vrstev (převzato z [38])</i>	32
<i>Obrázek 16 Warping (převzato z [39])</i>	33
<i>Obrázek 17 Zablokování průtoku extrudéru (převzato z [40])</i>	34
<i>Obrázek 18 Návrh extrudéru ve Fusion 360</i>	40
<i>Obrázek 19 Blokové schéma termokamery</i>	43
<i>Obrázek 20 SEEK Thermal Compact (převzato z [51])</i>	46
<i>Obrázek 21 Prvních 100 pořízených snímků</i>	48
<i>Obrázek 22 Převodní charakteristika mikrobolometru</i>	49
<i>Obrázek 23 Snímek s ID 1</i>	49
<i>Obrázek 24 Pohled mikroskopem na poškozené pole mikrobolometrů z SEEK Thermal Compact (převzato z [55])</i>	50
<i>Obrázek 25 Blokové schéma navrženého systému</i>	52
<i>Obrázek 26 Měření č.1</i>	55
<i>Obrázek 27 Měření č. 2</i>	55
<i>Obrázek 28 Závislost naměřených maximálních teplot termokamer</i>	56
<i>Obrázek 29 Zásuvný modul Thermal Analyzer do Octoprint</i>	63
<i>Obrázek 30 Sestavená 3D tiskárna</i>	66

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Možné sledované parametry během tisku</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 2 Vlastnosti krokového motoru SX17-0905 [47]</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 3 Porovnání parametrů termokamer.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 4 Výskyt snímků různých ID v prvních 20 minutách.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 5 Parametry termokamery FLUKE Ti25</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 6 Seznam použitých součástí ke stavbě 3D tiskárny</i>	<i>65</i>

Seznam použitých zkratek a symbolů

3D - trojrozměrný
ABS – materiál pro 3D tisk
ASA – materiál pro 3D tisk
CNC – číslicové řízení počítačem, nejčastěji u obráběcích strojů
DLP – druh 3D tiskárny
FDM – druh 3D tiskárny
HIPS – materiál pro 3D tisk
ID – identifikace snímku z termální kamery dle jeho typu
PET-G – materiál pro 3D tisk
PLA – materiál pro 3D tisk
PVA – materiál pro 3D tisk
REPRAP - replicating rapid prototyper
SL – druh 3D tiskárny
SLA – druh 3D tiskárny
SLS – druh 3D tiskárny
STL – formát stereolitografických souborů
TPE – materiál pro 3D tisk
TPU – materiál pro 3D tisk
XYZ – kartézský souřadnicový systém

λ_{\max}	(m)	Vlnová délka, na které je maximální intenzita vyzařování
b	(mm K)	Wienova konstanta
\hbar	(J s)	Redukovaná Planckova konstanta
I	(W m ⁻²)	Celková intenzita záření
k	(W m ⁻² K ⁻⁴)	Stefan-Boltzmannova konstanta
T	(K)	Termodynamická teplota
ϵ	(–)	Emisivita absolutně černého tělesa, $\epsilon \in < 0,1 >$

Obsah

Čestné prohlášení.....	5
Poděkování.....	7
Abstrakt.....	9
Abstract.....	9
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	13
Obsah.....	14
1 Úvod.....	17
2 Typy 3D tiskáren.....	18
3 FDM tiskárna.....	20
3.1 Části FDM tiskárny.....	20
3.1.1 Konstrukční rám.....	20
3.1.2 Elektronika.....	21
3.1.3 Tisková podložka.....	22
3.1.4 Extrudér.....	22
3.2 Zpracovávané materiály.....	25
3.2.1 Filamenty.....	25
3.2.2 Ostatní materiály.....	27
3.3 Firmware.....	27
3.4 Řídicí software.....	28
3.4.1 Hostitelský software.....	28
3.5 Tisková data.....	30
3.5.1 STL.....	30
3.5.2 Program pro rozdělení objektu na vrstvy (Slicer).....	30
3.6 Tiskové vady.....	31
3.7 Kontrola tisku.....	34
3.7.1 Jaké parametry lze sledovat.....	35
4 Sestavení 3D tiskárny a implementace kontrolního mechanismu.....	38
4.1 Návrh těla 3D tiskárny.....	38
4.2 Návrh tiskových hlav.....	39
4.2.1 Extruder na filament.....	39
4.2.2 Extrudér na kapalné materiály.....	39
4.3 Návrh kontrolního mechanismu.....	41
4.3.1 Využití termální kamery a vytvoření ovladače.....	41
4.3.2 Konstrukce termokamery.....	43
4.3.3 Výběr termokamery.....	44
4.3.4 SEEK thermal Compact.....	46
4.3.5 Realizace ovladače pro SEEK Thermal Compact.....	50
4.3.6 Implementace pluginu do Octoprint.....	51
4.3.7 Realizace navrženého systému.....	52
4.3.8 Ověření SEEK Thermal pomocí termokamery FLUKE Ti25.....	53
4.4 Možná vylepšení a budoucí vývoj.....	57
5 Závěr.....	58
6 Citovaná literatura.....	59
7 Přílohy.....	62

Příloha A	62
Příloha B.....	62
Příloha C.....	64

1 Úvod

3D tisk je inovativní technologie, která umožňuje v rámci několika minut až desítek hodin zhmotnit digitální návrh v reálný objekt. Technologie, určená prvotně pouze pro specialisty, se díky svojí univerzálnosti a atraktivitě začíná rozšiřovat také mezi širší veřejnost. Tato původně specifická oblast tak v posledních letech zažívá velký vzestup a těší se stále rostoucímu zájmu.

Studie [1] uvádí, že ročně vzroste počet prodaných 3D tiskáren průměrně o 50 %. Například v roce 2017 bylo prodáno téměř půl milionu přístrojů. Je tedy potřeba zajistit, aby technologie byla bezpečná a co nejvíce uživatelsky přívětivá. Vzhledem k velké komplexnosti 3D tisku stále ještě není možné bez příslušných úprav a nastavení přístroje vytvořit jakýkoliv objekt. Špatné nastavení vede ke špatným výsledkům nebo dokonce k úplnému selhání přístroje. Většina dostupných 3D tiskáren je momentálně přizpůsobena na tisk pouze z tuhých materiálů ve formě struny, což částečně limituje oblasti, pro které je možné tiskárnu použít.

Úkol této práce je navrhnout a vytvořit koncept univerzální 3D tiskárny, která dokáže vytvářet objekty z různorodých materiálů. Jeden z jejích rysů bude možnost snadné modifikace pro pokračování práce na jejím vývoji. Bude také navržen cenově dostupný experimentální systém, využívající termální kameru. Systém bude využitelný pro kontrolu tisku a pro budoucí vývoj 3D tiskáren.

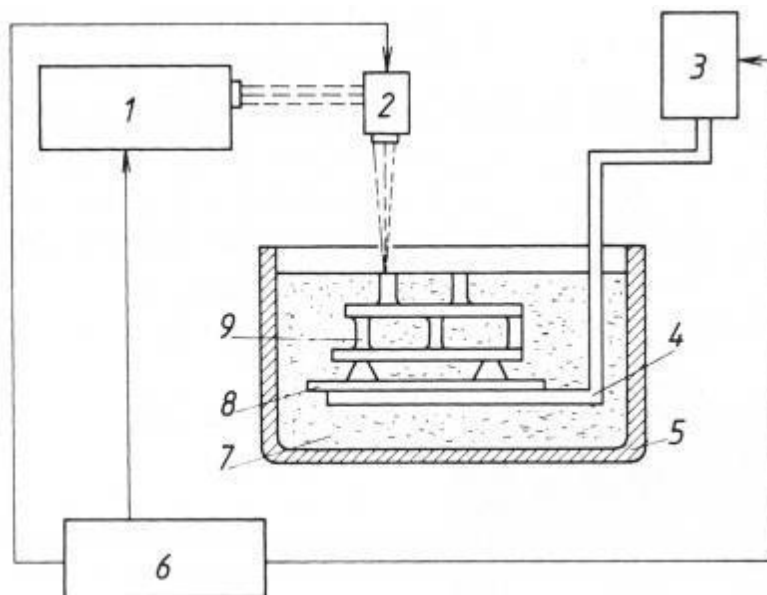
Nejprve práce seznámí čtenáře s nejčastěji používanými typy 3D tiskáren, následně se zaměří na nejrozšířenější typ, přiblíží různé možnosti vícemateriálové výroby, analyzují se různé problémy během tisku a navrhne se jejich řešení. Poté práce zacílí na použití termální kamery.

Ve druhé části práce bude vytvořena 3D tiskárna s více tiskovými hlavami a sledovacím systémem za pomoci termální kamery, který bude implementován do Octoprintu, což je dálkově řízený ovladač pro 3D tiskárny. V závěru části práce bude porovnán navržený sledovací systém s profesionální termální kamerou a na základě měření budou provedeny potřebné korekce.

2 Typy 3D tiskáren

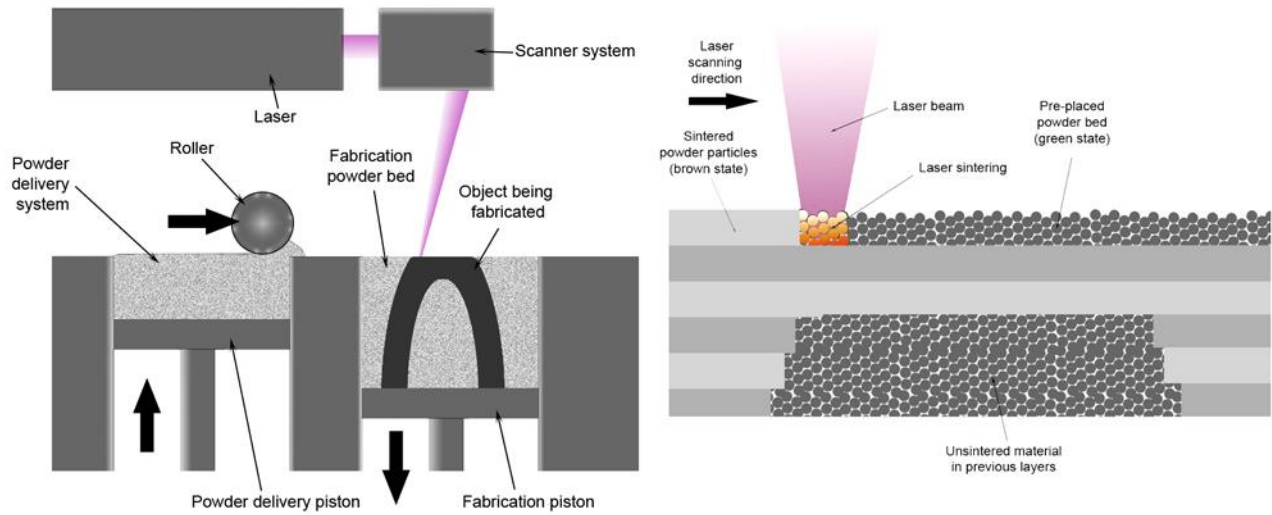
Obecně se rozlišují 3 základní typy 3D tiskáren. Nejrozšířenější model je FMD (fused deposition modeling), který se podle os následně dělí na typ kartézský, delta, scara a polar.

Další model je 3D tiskárna pracující na principu vytvrzování fotocitlivé tekuté pryskyřice. Tento model se značí jako SL (Stereolithography) a dělí se na typy DLP a SLA dle metody osvitu pryskyřice.

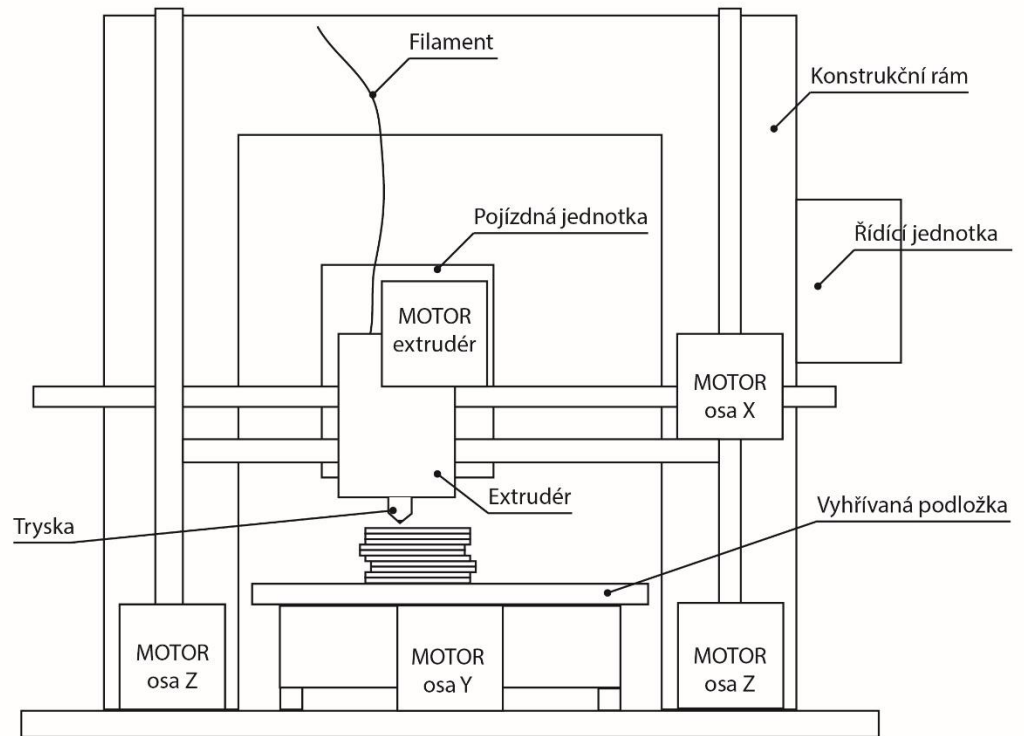


Obrázek 1 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie (převzato z [2])
(1 - laser, 2 - pracovní hlava laseru, 3 - systém pro posuv nosné desky, 4 - nosná deska, 5 - pracovní vana, 6 - CNC řídicí systém, 7 - fotopolymer, 8 - podložka, 9 - vyráběná součást)

Třetí model je SLS (Selective Laser Sintering), který pracuje na principu spékání tence nanášených vrstev práškových materiálů, jako jsou pevné kovy či některé druhy plastů, pomocí laseru, ve speciální vakuové komoře



Obrázek 2 Schéma SLS tiskárny (převzato z [3])

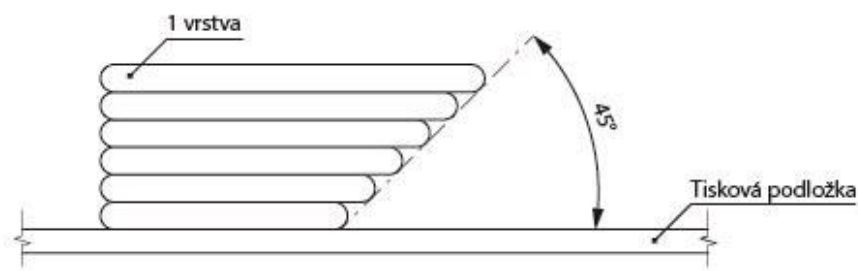


Obrázek 3 Schéma FDM tiskárny

V této práci bude nadále uvažován model FDM, typ kartézský se souřadnicovým systémem v osách XYZ. [4]

3 FDM tiskárna

FDM tiskárna je nejrozšířenější model. Materiál je hnán do speciální trysky, kde je taven a následně vytlačován v tenkých pruzích na tiskovou podložku a pomocí číslicového řízení vytváří objekt. Tento poměrně jednoduchý koncept se stal velice rozšířený zejména díky komunitě REPRAP [5], která jej jako open source (s volně přístupným zdrojovým kódem) od roku 2005 neustále vyvíjí a zdokonaluje. Tenké pruhy jsou nanášeny přírůstkově v ose Z od nulové souřadnice, až po konečnou nejvyšší polohu v ose Z. Tisk je možný vždy pouze směrem od osy Z a vrstvy musí být tištěny postupně od nejnižší až po nejvyšší. Jiné pořadí není možné. Povrch následující vrstvy by měl být nanášen tak, aby úhel dle Obrázek 4 byl maximálně 45° , jinak je třeba použít podpory (viz kapitola 3.7). Na výtiscích z těchto tiskáren jsou na stranách objektu většinou dobře viditelné jednotlivé vrstvy, vznikající právě postupným nanášením tenkých pruhů, což je charakteristický znak těchto výtisků. [6]



Obrázek 4 Maximální úhel přesahu

3.1 Části FDM tiskárny

Spektrum FDM tiskáren je široké. Lze u nich ovšem nalézt charakteristické části, které jsou pro všechny přístroje principiálně shodné a liší se realizací. Jedná se o konstrukční rám, tiskovou podložku, extrudér a řídicí jednotku.

3.1.1 Konstrukční rám

Konstrukční řešení rozhoduje o výsledné tuhosti a stabilitě přístroje. Konstrukčním rámem je chápána kostra 3D tiskárny, na které jsou umístěny jednotlivé komponenty. Materiálem je často dřevěná překližka, různé druhy kovů – např. hliníkové profily či existují i takové verze tiskáren, kdy celý rám je vytvořen pouze z plastů pomocí 3D tisku. [7] Nejznámějšími konstrukčními rámy jsou „krychlový rám“, jehož výhodou je vysoká stabilita a robustnost. Často se

používá celokovová krytá konstrukce. Tento typ tiskáren je více oblíben u laické sekce veřejnosti, kdy není kladen důraz na další vývoj tiskárny. Nevýhodou může být špatná přístupnost, hmotnost, zhoršená či žádná možnost vylepšení a vyšší pořizovací náklady.

Druh typ rámu je tzv. „Oboustranné L“. Je většinou tvořen dvěma pravoúhlými, nejčastěji čtvercovými rámy, kdy jeden tvoří základnu a druhý je na něm vztyčen pod pravým úhlem. [8]



Obrázek 5 Ultimaker S5 (převzato z [9])



Obrázek 6 Prusa MK3s (převzato z [10])

3.1.2 Elektronika

Pohonnou část 3D tiskárny tvoří krokové motory, které se starají o pohyb extruderu ve směru os a vytlačování materiálů. Dále zde jsou koncové spínače pro registraci počátku a konce os. Slouží také ke kalibraci před započítím tiskové úlohy. Zdroj napájení je nejčastěji počítačový zdroj ATX, či spínaný průmyslový zdroj. Řídící jednotka je založena na principu CNC, zajišťuje vysílání impulsů DIR a STEP do budičů krokových motorů. Nejrozšířenějším typem řídicí jednotky je mikroprocesor Arduino s nástavbou Ramps včetně budičů pro krokové motory.

3.1.3 Tisková podložka

Tisková podložka neboli „heated bed“ slouží jako podklad pro tisknutý objekt. Její rozměr definuje maximální plochu tisknutého objektu. Může mít různé tvary, častý je čtverec, obdélník nebo kruh. Rozměry se pohybují v desítkách cm. Opět existuje nepřeberné množství podložek, které lze rozdělit na 2 druhy – nevyhřívané a vyhřívané podložky. Obecně platí, že využitím vyhřívané podložky dochází k lepším výsledkům [11] [12], jelikož se zabraňuje nežádoucímu jevu, tzv. warpingu, který je podrobněji rozebrán v kapitole 3.6. [13] [14]

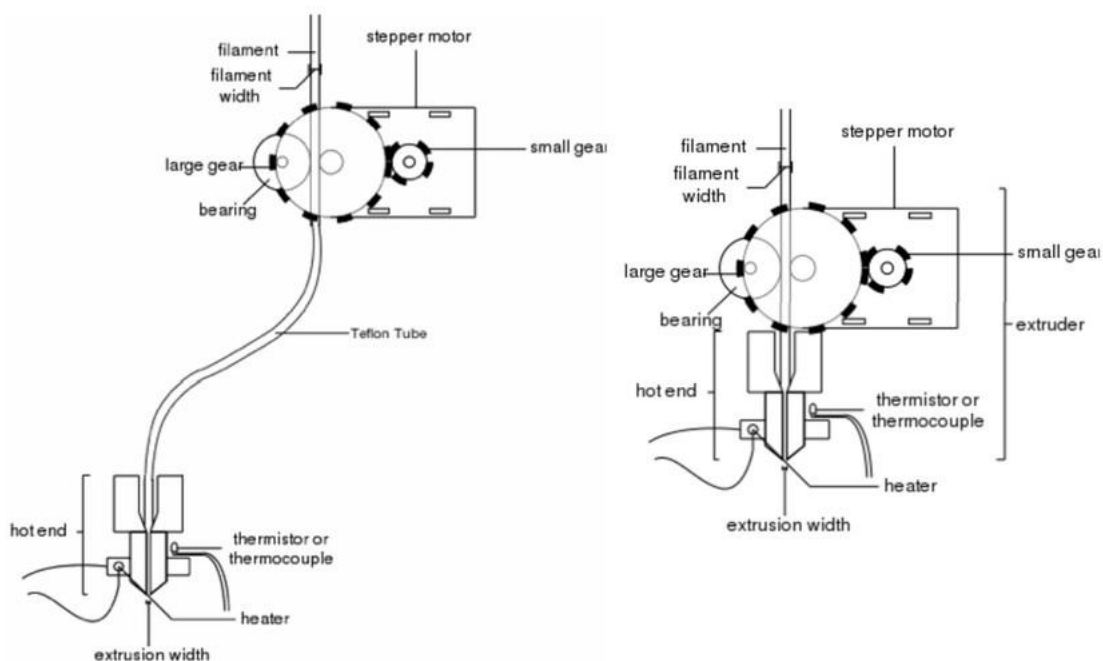
3.1.4 Extrudér

Extrudér neboli tisková hlava slouží k dávkování materiálu. Jedná se o soustavu, na jejímž konci je posuvná jednotka s tryskou, kterou dochází k vytlačování materiálu na tiskovou podložku. V případě, že je stavební materiál třeba roztavit, zastává také tuto funkci. Jeho pohyb ve směru osy X zajišťuje krokový motor řemenovým převodem. Pomocí krokového motoru je řízeno také dávkování materiálu skrz extrudér.

3.1.4.1 Jeden extrudér

Standartní extrudéry se dělí na bowdenový a přímý extrudér. U přímého extrudéru jsou všechny komponenty součástí posuvné jednotky, u bowdenového extrudéru v posuvné jednotce dochází pouze k tavení a extruzi materiálu. Výhoda užití jednoho extrudéru je vysoká přesnost, díky jeho nízké hmotnosti. Nevýhoda je možnost tisknout pouze z jednoho materiálu v probíhající tiskové úloze. Je zde možnost pozastavit tisk, vyměnit v extrudéru materiál a pokračovat s jiným materiálem.

Neustále se objevují nové modely rozmanitých druhů extrudérů, které jsou určeny pro různé druhy materiálů. Většinou se jedná o experimentální práce v domácích podmínkách, jelikož tato oblast 3D tisku ještě není plně rozšířena. [15] [16] [17]

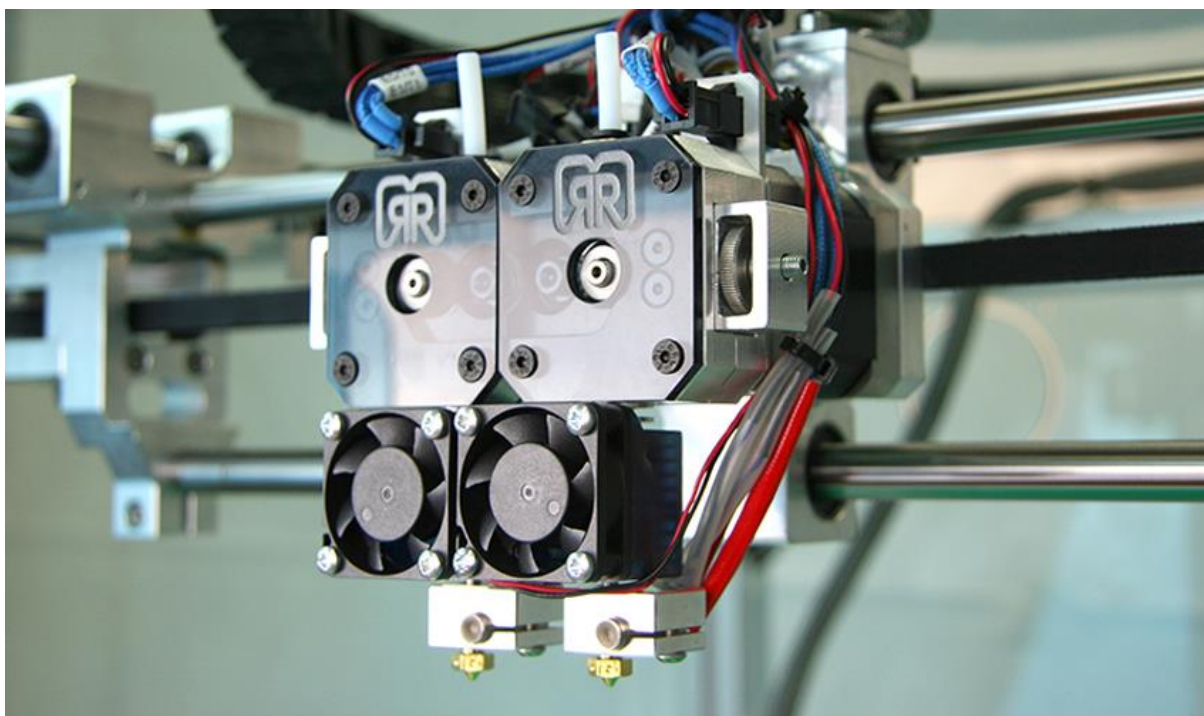


Obrázek 7 Porovnání bowden a přímého extrudéru (převzato z [18])

3.1.4.2 Více extruderů, multimateriálový tisk

Pro některé aplikace může být přínosný vícemateriálový tisk, kterého je možné docílit například rozšířením posuvné jednotky o další extrudér. Každý extrudér tak individuálně zpracovává vlastní materiál, který je v něm zaveden. [19]

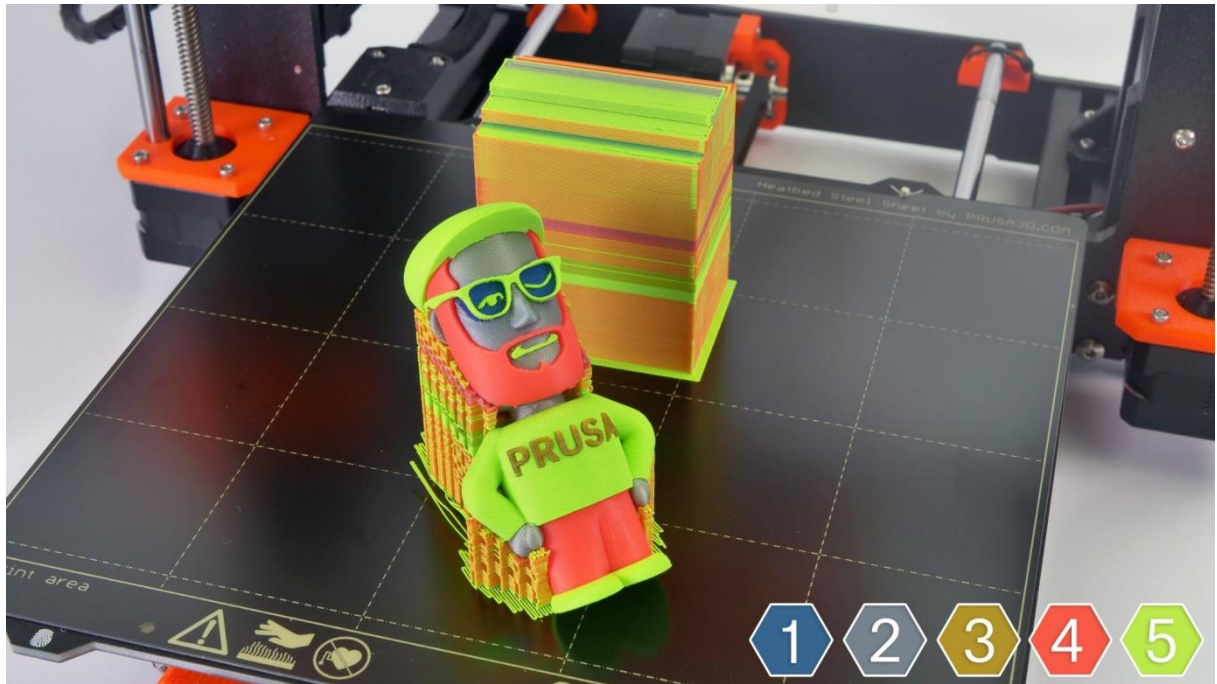
Vzniká zde několik problémů, které je třeba řešit. Zvýšením počtu extruderů se zvýší také výsledná hmotnost posuvné jednotky, čímž může dojít ke zvýšení vibrací a nižší akceleraci při posunu, což může zapříčinit nižší kvalitu výsledného tisku. [20] Částečným řešením se nabízí použití bowdenového extrudéru, u kterého je ovšem nevýhoda ve značně omezeném spektru použitelných materiálů pro 3D tisk, zejména u flexibilních materiálů jako TPU. Zvýšením počtu extruderů na posuvné jednotce se také zvětší její objem, čímž se sníží tiskový prostor. Dalším problémem může být rozdílná vzdálenost trysek od osy Z. [21]



Obrázek 8 Dual Extruder (převzato z [22])

Dalším řešením je zachování jednoho extruderu v pojízdné jednotce a vytvoření externího systému výměny materiálu. Tím se odstraní problémy s hmotností, díky nezvětšené velikosti pojízdné jednotky zůstane také stejně velký tiskový prostor. Protože je jen jedna tryska, nevzniká zde problém s rozdílnou vzdáleností trysek od osy Z.

Problémem je zde čištění trysky. Při každé výměně materiálu v trysce zůstává malá část taveniny, předchozího materiálu, která by mohla kontaminovat nově zavedený materiál. Tento problém je řešen tak, že v průběhu tisku objektu se ve vymezené oblasti tiskové podložky tiskne zároveň ještě jeden objekt, tzv. „čisticí věž“. Ta slouží k tomu, že když dojde k výměně materiálu, nepokračuje se v tisku přímo, ale tiskárna po definovaný časový úsek tiskne „čisticí věž“, dokud se tryska nevyčistí. Následně se pokračuje na tisknutém objektu. Tím dochází k zvýšené spotřebě materiálu, která je ještě umocněna skutečností, že „čisticí věž“ musí být tisknuta i v případě, že není zadán příkaz k výměně materiálu. Existují již algoritmy, které umí částečně optimalizovat „čisticí věž“, aby docházelo k co nejmenší spotřebě materiálu při výměně. Řeší se to například čištěním trysky do výplně „čisticí věže“.



Obrázek 9 Multimateriálový tisk s čistící věží (převzato z [23])

Další problém je mechanická výměna materiálu. Multimateriálový tisk je v současné době možný pouze s materiálem typu filament (viz kapitola 3.2.1), kdy dochází k mechanickému useknutí filamentu v externím systému výměny materiálu. Systém je velice citlivý na různé druhy filamentu. Často se stává, že oddělení struny není dokonalé a nová struna je poté chybně zavedena, či není zavedena vůbec. [24]

3.2 Zpracovávané materiály

3.2.1 Filamenty

Filament je spotřební materiál pro 3D tiskárny. Filamenty jsou tiskové struny z různých materiálů o tloušťce 1,75 mm, či stále méně časté tloušťce 3 mm. Bývají navinuty na cívkách.

Filament je pomocí krokového motoru pomalu nasouván do extrudéru, kde dochází k jeho tavení a následné extruzi v tenkých pruzích, pomocí nichž je postupně vytvářen objekt.



Obrázek 10 Filament PLA (převzato z [25])

PLA

Nejčastěji používaný materiál pro FDM 3D tisk je PLA, celým jménem kyselina polylactonová, což je v základu pšeničný nebo kukuřičný škrob. Výhoda materiálu je jeho nenáročnost při tisku díky nízké tepelné rozpínivosti, dobrá přilnavost první vrstvy na podložku a vzájemná přilnavost jednotlivých vrstev. Je rozložitelný v přírodě. Nevýhoda je deformace, ke které dochází už při teplotě 65 °C. Existuje mnoho modifikací, které obsahují příměsi, například dřevo, měď, karbonová vlákna, aromatické látky, různé mikročástice, atd. . .

PETG

Houževnatý materiál s nízkou tepelnou roztažností, lze jej úspěšně použít na větší objekty. Jedná se o modifikaci Polyethylentereftalátu (PET), Písmeno „G“ na konci značí, že proti klasickému PET je zde přidán modifikovaný glykol. Objekty z PETG jsou pružné, teplotně stálé a mechanicky odolné.

ABS

Mezi další, často používané filamenty patří ABS – Akrylonitrilbutadienstyren. Je velice pružný a odolný vůči mechanickému poškození. Výborně také odolává vysokým teplotám až do 105 °C, rozpouští se v acetonu, je tedy možné výsledný tisk upravovat v acetonové lázni. Mezi jeho nevýhody patří velká tepelná roztažnost, a tedy vyšší náročnost na tisk a také škodlivé výpary, které se uvolňují během tisku.

Ostatní filamenty

Existuje nepřehledná řada dalších druhů filamentů. Každý se vyznačuje specifickými vlastnostmi – Flexibilní TPU, TPE, nylonové, vinylové, ASA, HIPS, PVA a další. [26]

3.2.2 Ostatní materiály

FDM 3D tisk není limitovaný pouze na plasty. Začíná se stále více objevovat v potravinářském průmyslu, kde se tiskne například z čokolády. [27] [28] Ve stavitelství se objevují první prototypy domů tištěných pomocí obrovských 3D tiskáren [29], úspěšně se tiskne keramika. [30] [31] Je zde ovšem potřeba uvědomit si základní předpoklady:

1. Lze tisknout pouze z materiálů, které lze uvést do tekutého skupenství. Tyto materiály musí být následně schopné v rozumném časovém intervalu tuhnout, či dosahovat takových vlastností, aby mohl tisk pokračovat.
2. Materiál musí být homogenní, aby se docílilo stejných vlastností při tisku. Nesplnění tohoto předpokladu by mohlo vést ke špatným výsledkům vzhledem k obrovské termodynamické komplexnosti 3D tisku. Případně by musely být nalezeny algoritmy, které zajistí stejné výsledné podmínky.
3. Potřeba speciálního extrudéru pro daný materiál. V případě, že se uvažuje tisk z tekutých materiálů, je třeba vyvinout kompletně nový extruder pro tyto materiály, jelikož nejsou standardizované jako filamenty. Zde může být problémem teplota tání daného materiálu. Proto se například zatím nevyužívá FDM tisk pro kovy, kde se teplota tání pohybuje nad hranicí 1000 °C
4. Bezpečnost. V případě, že je materiál určen ke konzumaci, je třeba respektovat hygienické normy.

3.3 Firmware

Firmware ovládá základní desku 3D tiskárny, řídí v reálném čase všechny aktivity přístroje. Koordinuje extrudéry, ovladače krokových motorů, senzory, světla, LCD display, tlačítka a další ovladače spojené s tiskárnou.

Firmware Marlin ve spolupráci s jednodeskovým mikropočítačem Arduino se shieldem RAMPS (reprap arduino mega pololu shield) tvoří většinový podíl firmware u 3D tiskáren. Marlin vznikl v roce 2011 jako open-source skupiny REPRAP. Vychází ze starších firmware Sprinter a grbl, používaných pro CNC stroje. Marlin pracuje na finančně přístupných 8-bitových Atmel AVR mikrokontrolerech. Marlin je velice adaptivní a lze ho snadno přizpůsobovat různým druhům 3D tiskáren.

Ovládacím jazykem Marlinu je derivát G-code. G-code předávají tiskárně jednoduché příkazy, například „nastav teplotu podložky na 60 °C“ nebo „proved' posun pojízdné jednotky ve směru osy X o 10 mm rychlostí 20 mm/s“. K vytištění modelu pomocí Marlinu musí být data konvertována

na G-code. K tomu se používá software Slicer (viz. kapitola 3.5.1). Jelikož je velká různorodost 3D tiskáren, není možné použít jeden totožný soubor G-code pro více různých tiskáren.

Jak Marlin přijímá příkazy, zařazuje je do fronty k vykonání v tom pořadí, v jakém byly přčteny. Je zde hlavní a vedlejší smyčka. Hlavní smyčka zpracovává frontu a převádí lineární pohyby na přesně načasované elektronické impulsy do krokových motorů, řídí aktualizaci displeje a události kontroléru. Vedlejší smyčka řídí mnohem pomaleji senzory a vyhřívání tělesa. [32]

3.4 Řídicí software

Všechny 3D tiskárny potřebují ke svému provozu řídicí software. Tento software je zodpovědný za celkový průběh tisku. Marlin může být kontrolován kompletně hostitelským softwarem nebo interním systémem z SD karty.

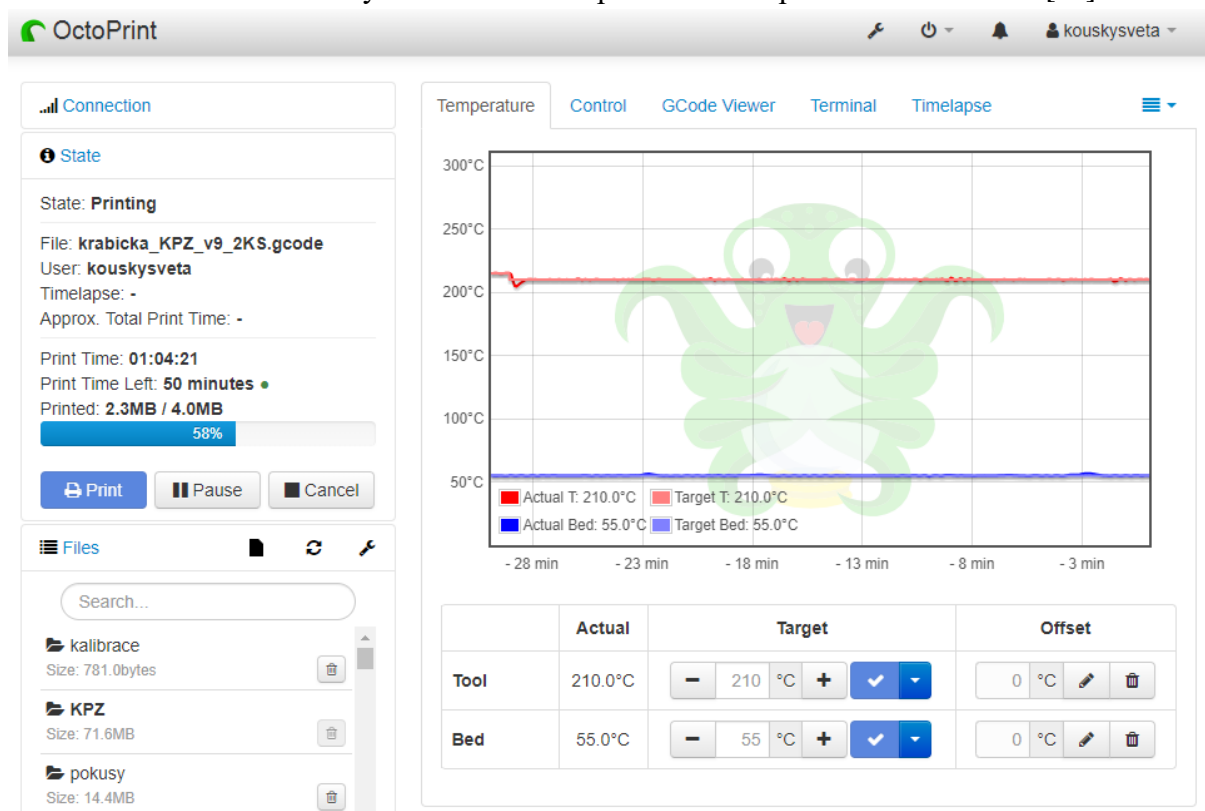
3.4.1 Hostitelský software

Hostitelské software (hostitelská programové vybavení) jsou dostupné pro několik platform. Pro klasické počítače, kdy komunikace s tiskárnou probíhá pomocí USB připojení, jsou to například Pronterface a Repeatier Host. Zde je podmínka, že počítač musí být neustále připojen k tiskárně. Stále více se začíná prosazovat vzdálené ovládání tiskáren, které umožňuje zrychlení a usnadnění správy tisku. Přenos na SD kartu, ač je bezdrátový, postrádá většinou výhod, které umožňuje komplexní dálkový hostitelský software pro platformu Raspberry Pi. Mezi nejoblíbenější se řadí OctoPrint a AstroPrint.

Vzdálený hostitelský software nahrazuje běžně používané software na kontrolu tiskáren, jako jsou Pronterface, Cura nebo Repetier. Vzdálený hostitelský software poskytuje webové rozhraní, které umožňuje řídit všechny funkce potřebné pro vzdálenou správu 3D tiskárny, navíc lze implementovat další rozšíření jako například automatické pořizování snímků během tisku, správa tiskové fronty, cloudové úložiště apod. Pro účely této diplomové práce bude využíván Octoprint. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě faktu, že v Octoprint je podporován vývoj vlastních zásuvných modulů (pluginů), jejichž vývoj a implementace je velice dobře popsána v dokumentaci. OctoPrint je opensource.

Octoprint

Octoprint je napsán v programovacím jazyce python a je doporučováno provozovat jej na mikropočítači Raspberry Pi. Existují ovšem i jiné mikropočítače, na kterých lze Octoprint provozovat. Funguje na operačním systému OctoPi, což je odnož OS Raspbian. Obraz disku pro Raspberry s linuxovou distribucí a předinstalovaným OctoPrintem je v plné verzi volně ke stažení na oficiálních internetových stránkách Octoprintu. Provoz probíhá v lokální síti. [33]



Obrázek 11 Prostředí OctoPrint

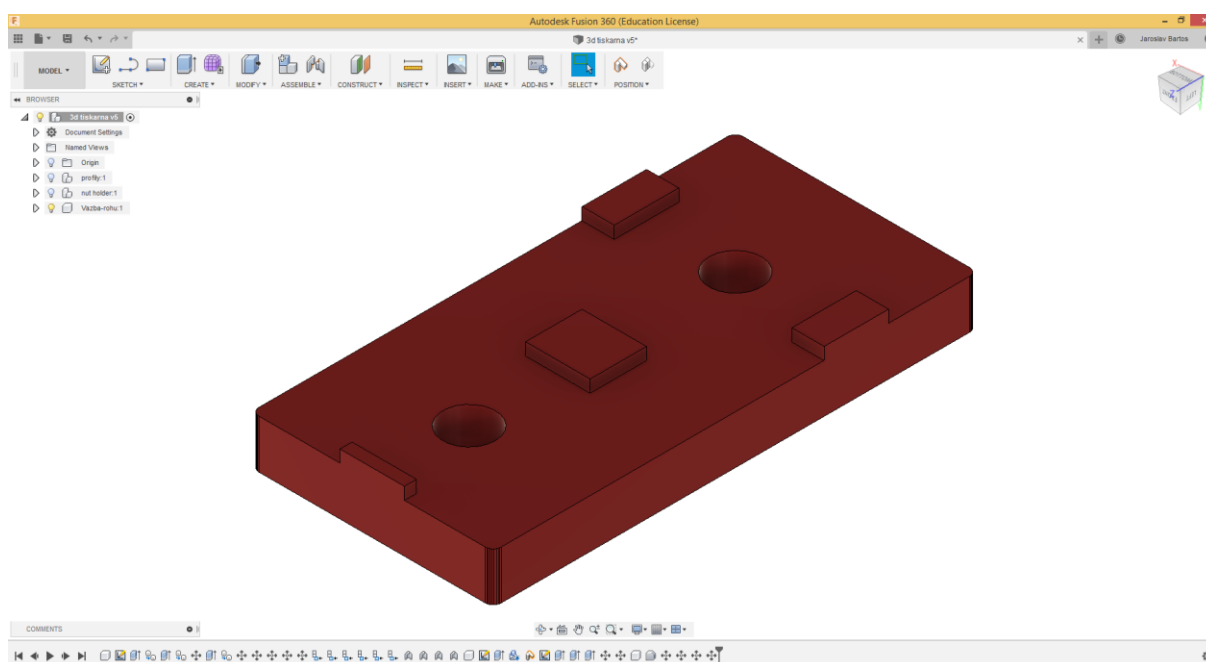
Octoprint vyžaduje připojení k internetu. To lze docílit buď připojením Raspberry Pi ke směrovači pomocí ethernetového kabelu nebo přes WiFi. Tím ovšem vzniká riziko napadení sítě hackery. Octoprint toto řeší vytvořením uživatelského účtu a hesla, kterým se může uživatel připojit k ovládacímu rozhraní ve webovém prohlížeči. Tiskárna je zařízení, které může být nebezpečné

při špatné manipulaci, například může způsobit požár, je tedy důležité zvolit patřičné heslo. Existuje také možnost ovládat Octoprint bez připojení k síti. K Raspberry Pi je v tomto případě třeba připojit minimálně display a klávesnici. Je třeba také instalovat webový prohlížeč pro připojení se k danému portu. Zde poté pomocí adresy `http://localhost/` lze ovládat Octoprint. Dochází tak ovšem ke ztrátě některých funkcí, jako využití cloudových služeb. Octoprint lze také provozovat z veřejné sítě. [34] V této práci bude Octoprint provozován pomocí Wifi, kdy je možné tiskárnu ovládat z jakéhokoliv zařízení s webovým prohlížečem, který je připojen k místní síti.

3.5 Tisková data

3.5.1 STL

Objekt, který je požadován k vytisknutí musí být nejprve vytvořen v 3D virtuální podobě. K tomuto účelu slouží programy známé jako CAD (Computer aided design). Jedná se o software (programové vybavení), který podporuje nástroje pro tvorbu virtuálních modelů objektů. Mezi volně dostupné patří například FreeCAD, OpenSCAD, Tinkercad, Autodesk Fusion 360, Shet-
chUp, atd.



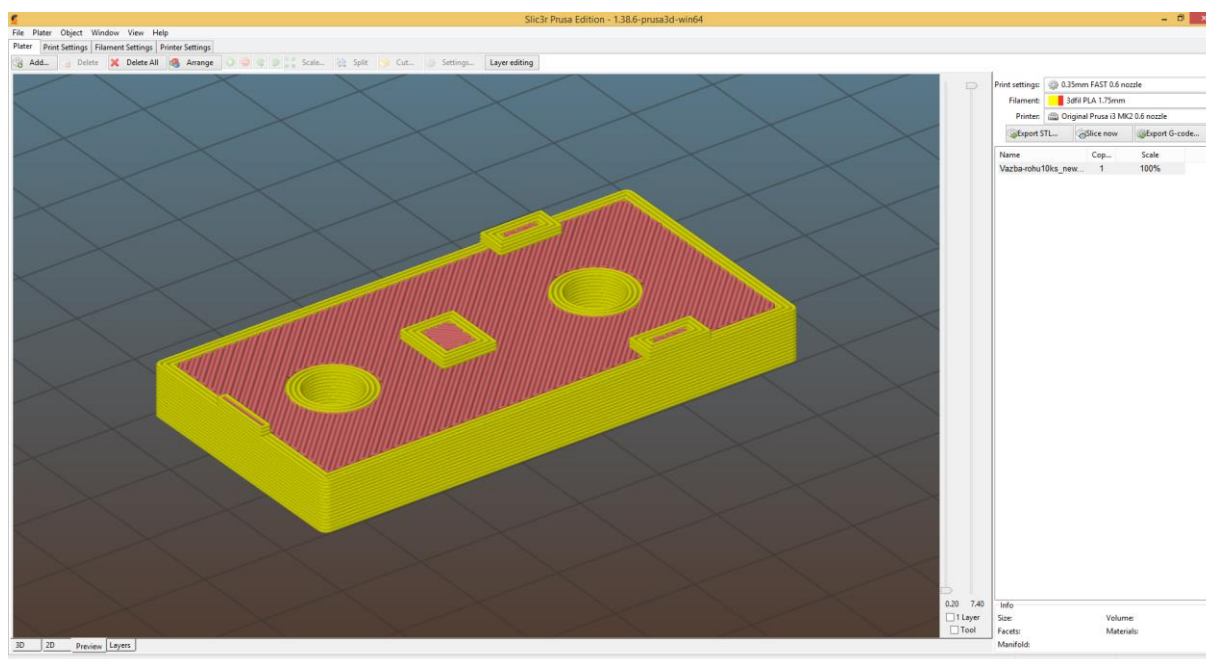
Obrázek 12 Návrh součástky v Fusion 360

Výstupní formát, který se nadále v řetězci 3D tisku zpracovává, musí být formát STL. STL soubory popisují triangulovaný povrch objektu pomocí jednotkových normálových vektorů a vrcholů trojúhelníků ve trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic.

3.5.2 Program pro rozdělení objektu na vrstvy (Slicer)

Po vytvoření STL souboru je potřeba jej převést na soubor příkazů v jazyce G-code. K tomu se používá tzv. *slicer*. Zjednodušeně řečeno *slicer* převádí uniformní 3D model reprezentovaný pouze geometrií povrchu na jednotlivé pohyby 3D tiskárny, které vedou k vytvoření fyzického objektu. *Slicer* rozdělí model na jednotlivé tenké vrstvy. Tomuto procesu se říká „*slicování*“. Nastavení *sliceru* umožňuje mnoho variant, jak daný objekt vytvořit, lze nastavit například průměr vytlačované hmoty z extrudéru, výšku vrstvy, rychlost posunu krokových motorů, měřítko

objektu, teplotu trysky a podložky, typ materiálu, atd. Mezi známé zástupce patří například Cura, Slic3r, Skeinforge, Simplify3D. [35] [36]



Obrázek 13 Úprava součástky ve sliceru



Obrázek 14 Pracovní postup při návrhu pro 3D tisk

3.6 Tiskové vady

I přes velký rozmach 3D tiskáren se uživatelé neustále setkávají s problémy, které vedou k selhání tisku. Momentálně neexistuje studie, která by dokázala procentuálně vyčíslit selhání 3D tiskových úloh. Záleží na mnoha faktorech. Jisté ale je, že k těmto chybám dochází. Níže jsou stručně uvedené zásadní chyby, které vedou k znehodnocení tisku, případně k poškození celé tiskárny.

Odlepení první vrstvy

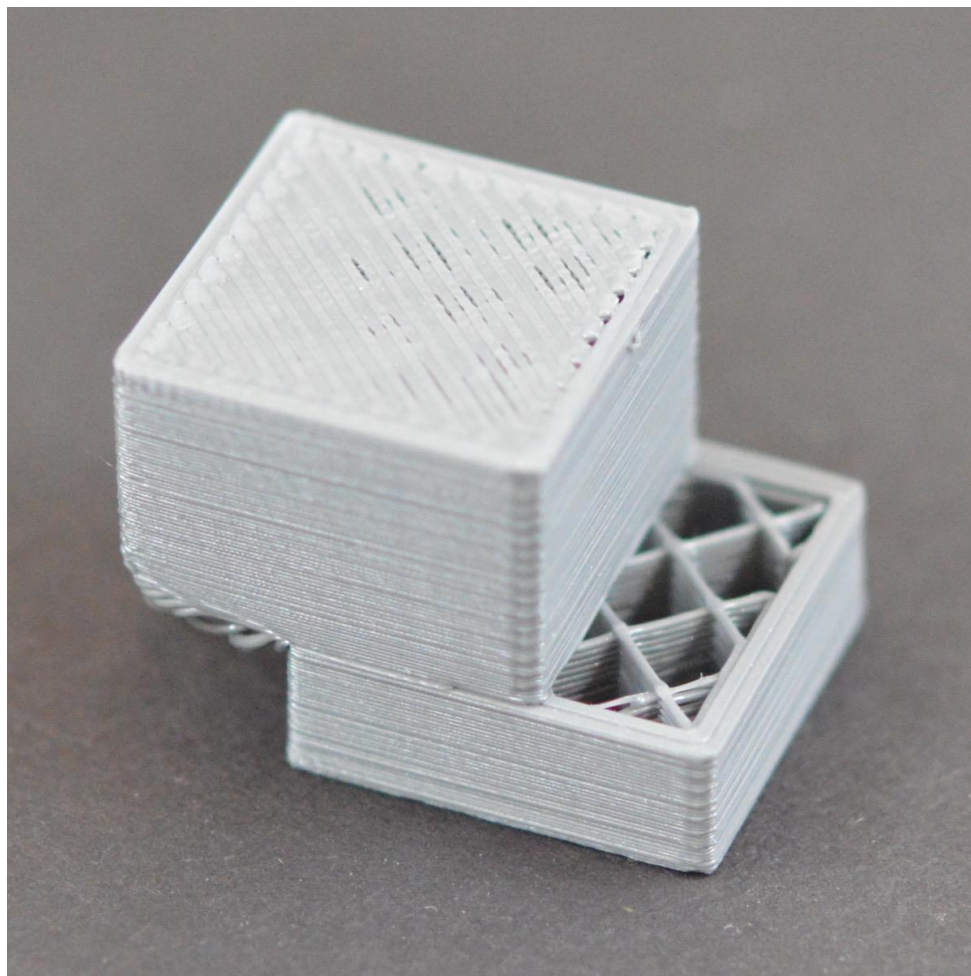
Příčinou častých chyb při tisku je špatné přilnutí první vrstvy k podložce, které vede k tomu, že tisk selže hned na začátku. Popřípadě může selhat po několika vytištěných vrstvách.

Celý tisk se odlepí od podložky, může se nalepit na extrudér a způsobit jeho poničení. Také se může stát, že se odlepená část modelu přemístí takovým způsobem, že tiskárna bude pokračovat v tisku s absencí předchozích vrstev. Bude tedy tisknout do vzduchu.

Pro správnou přilnavost první vrstvy je třeba zkalibrovat osu Z tak, aby extruder ve všech místech měl od podložky stejnou vzdálenost. Dále je třeba zajistit, aby podložka byla zbavena mastnot a nečistot a nastavení správné teploty. Doporučuje se také snížit rychlost tisku u první vrstvy.

Posunutí vrstvy

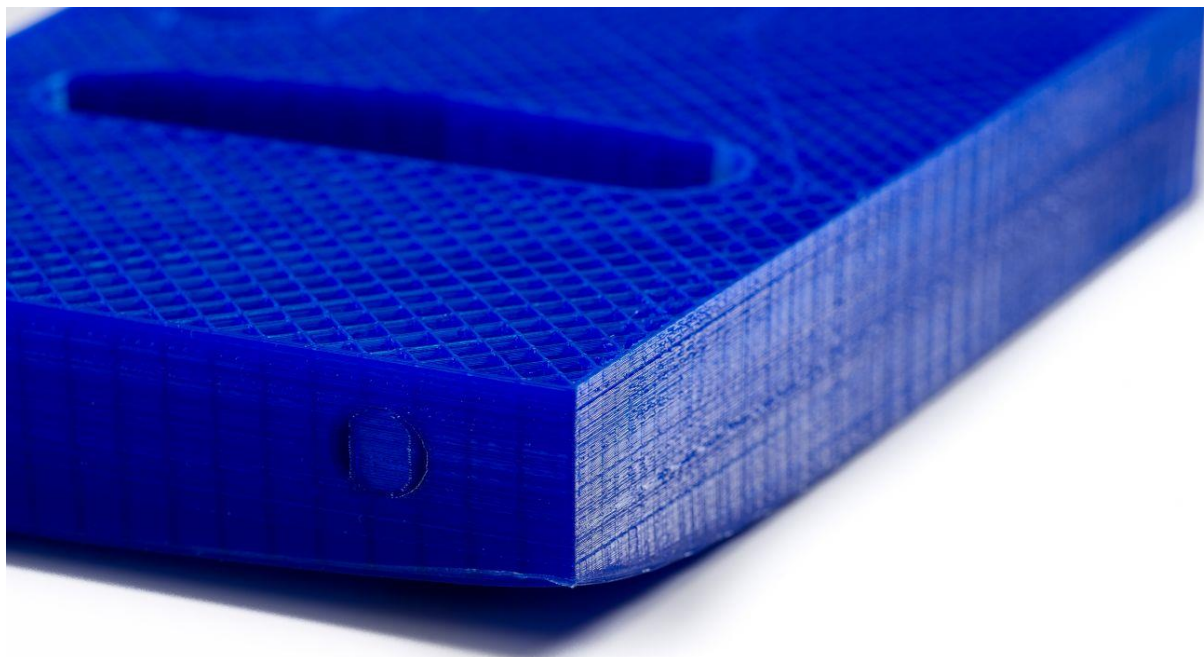
Špatný pohyb jedné z os může způsobit, že tiskárna špatně vyhodnotí polohu pojízdné jednotky a tiskárna pokračuje v tisku na chybně posunutých souřadnicích. Příčinou může být kolize extrudéru se špatně položenou vrstvou materiálu, která se například kvůli špatnému návrhu objektu či vlivem rozdílných teplot vrstev dostala výše, než je aktuální výška extrudéru. [37]



Obrázek 15 Posun vrstev (převzato z [38])

Warping (zkroucení)

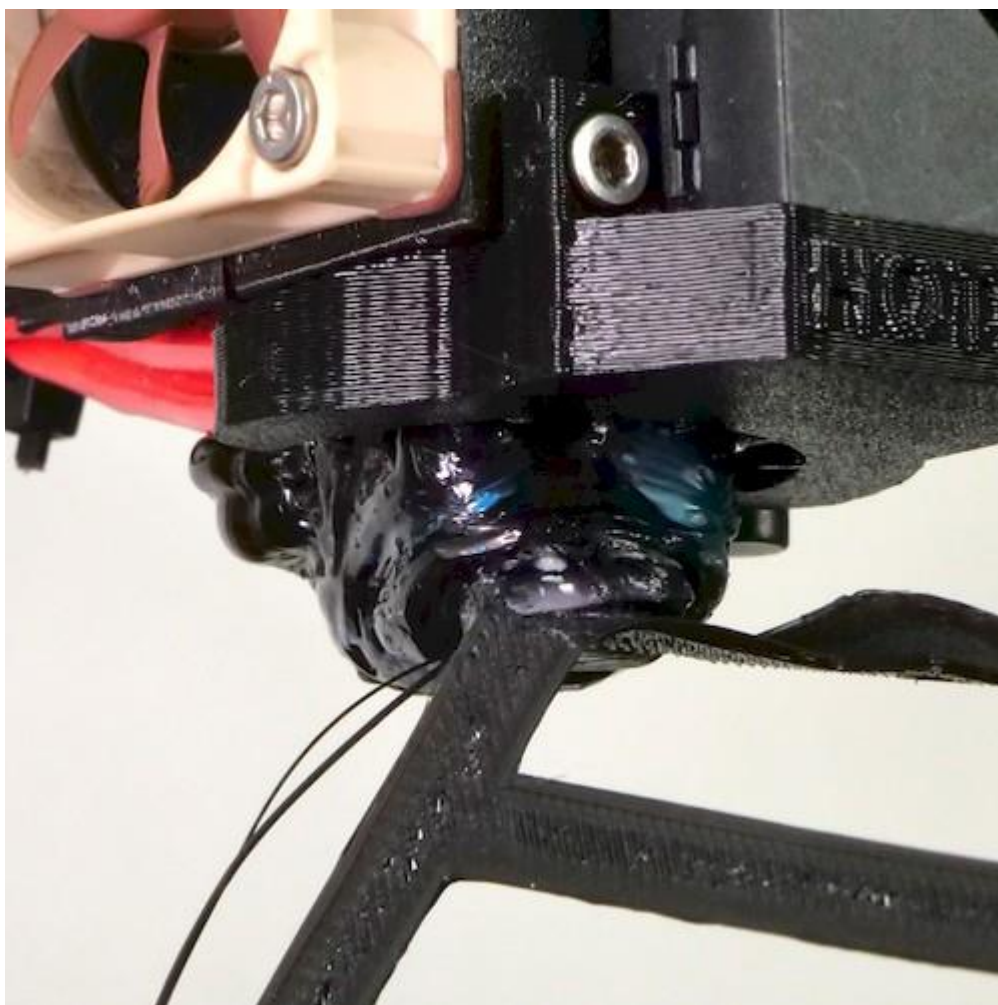
Warping se charakterizuje jako odlepení části styčné plochy objektu od tiskové podložky. Tento typ chyby se může objevit v případě, že teplota vyhřívané podložky fluktuuje a objekt chladne neuniformně. Další příčinou je špatně kalibrovaná tisková podložka, kdy vzdálenost mezi tryskou a podložkou není konstantní. Dále to může být také výskyt mastnot či nečistot, které zabraňují dobrému přilnutí, popřípadě vibrace či náhlý náraz do tiskárny.



Obrázek 16 Warping (převzato z [39])

Zablokování průtoku extrudéru

Tento problém většinou souvisí s předchozími chybami. Jedná se o jednu z nejrizikovějších a často se opakujících chyb. Část extrudovaného materiálu se zachytí na trysce a zabrání dalšímu materiálu, aby byl vrstven dle programu. Jelikož tiskárna nedokáže detekovat, že materiál není správně nanášen, tiskárna pokračuje v extruzi, což vede k vytvoření bulky žhavého plastu, která může vyrůst do takových rozměrů, že začne vyplňovat extrudér, což může zapříčinit jeho trvalé poškození, či zničení.



Obrázek 17 Zablokování průtoku extrudéru (převzato z [40])

Méně významné vady

Mezi další vady, které jsou spíše estetického charakteru lze uvést například *stringování*, které je charakteristické tenkými vlákny, které vznikají v místech, kde tisk probíhat nemá, pouze má dojít k posunu extrudéru. Tento jev lze ovšem také využít. Například k experimentálnímu tisku kartáčů. [41] **Další chyby:** Nedostatečná nebo zvýšená extruze materiálu, nedostatečné/zvýšené zahřívání tiskové podložky a extrudéru, deformace objektu nerovnoměrným chladnutím,

3.7 Kontrola tisku

Marlin již sám o sobě obsahuje některé kontrolní mechanismy, které hlídají zejména teplotní výkyvy extrudéru a tiskové podložky na základě dat, která jsou získávána z termistorů připojených k topným tělesům. Pro zvýšení efektivity 3D tisku je třeba začít vyvíjet systém, který bude schopný detekovat či zcela odstranit chyby.

Automatická detekce a oprava chyb může probíhat v několika fázích.

1. Při tvorbě modelu – implementací algoritmů přímo do CAD programů, kde by měl uživatel možnost zkontrolovat si reprodukovatelnost svého modelu. Po zadání několika vstupních parametrů, jako druh materiálu, styčná plocha s tiskovou podložkou, náročnost na detail, apod. by program na základě statistických modelů a metody konečných prvků byl schopen predikovat možná rizika.
2. V průběhu převodu na vrstvy - daný *slicer* by mohl vyhodnocovat různé rizikové části a upravovat podle nich lokálně svá nastavení. Za uvážení by stálo provázání *sliceru* a CAD programu, kde by *slicer* měl k dispozici vyhodnocení z CAD programu. U většiny *slicerů* je momentálně situace detekce taková, že existuje možnost generovat podpůrné objekty. Tato „lešení“ se generují automaticky a tisknou se současně s daným objektem. Umožňují tisknutelnost objektů, jejichž některé části obsahují převis 45° (viz Obrázek 4). Další funkci, kterou umožňuje např. *slicer* Slic3r PE je zpomalení tisku, pokud vypočtený čas na vytisknutí určité vrstvy je pod definovaným minimálním časem pro tisk jedné vrstvy.
3. Při probíhajícímu tisku – kontrola v reálném čase na základě vyhodnocených informací přijatých ze senzorů v okolí tiskárny.
4. Automatická kontrola objektu po jeho dokončení.

3.7.1 Jaké parametry lze sledovat

V případě 3. fáze lze sledovat několik parametrů. Pro přehlednost jsou uvedeny v Tabulka 1.

Sledované parametry během 3. fáze					
Teplota	prostředí	tištěný objekt	komponenty tiskárny		
Vzduch	vlhkost		proudění		
Správa tisku	filament	warping	posun vrstev	ucpání trysky	přírůstek vrstev dle modelu

Tabulka 1 Možné sledované parametry během tisku

Teplota

Teplotu prostředí lze měřit jednoduše pomocí teplotních senzorů. Teplotu komponentů tiskárny lze měřit stejným způsobem, zde je třeba zdůraznit fakt, že na každé měřené těleso bude třeba použít nový senzor. U tisknutého objektu již dochází ke komplikacím. Senzor nelze umístit přímo na tisknutý objekt. V krajních případech je to možné, ale je to velice nepraktické.

Nabízí se možnost použít bezdotykové měření teploty. V případě použití bodových infračervených teploměrů lze dostat spolehlivé, přesné a rychlé výsledky. Je zde ovšem stejná limitace – na každý objekt je třeba opět použít individuálně nastavený senzor. Řešením problému je termální kamera, která je schopná obsáhnout celé pole.

Vzduch

Proudění vzduchu lze měřit vhodně zvoleným anemometrem. Tento parametr je výhodné měřit například u materiálů, které jsou náchylné na prudké změny teplot. Z uvedených materiálů v této práci je to zejména ABS.

Vlhkost vzduchu ovlivňuje kvalitu filamentu. Mikročástice vody zachycené na filamentu výrazně zhoršují kvalitu tisku. Při zahřívání filamentu v extrudéru dochází k odpařování vody, které způsobuje proměnlivý průtok filamentu a vede k tvorbě bublin na výsledném tisku.

Správa tisku

Filament: Pokud není ošetřeno, tiskárna pokračuje v tiskové úloze až do konce nehledě na to, že byl filament vypotřebován v průběhu tisku. Aktuální senzory na kontrolu filamentu fungují na mechanickém principu, kdy procházející filament stlačuje přímo či nepřímo koncový spínač. V případě vypotřebování filamentu dojde k uvolnění spínače. V případě rozsáhlejších tisků, které jsou v rámci desítek hodin je vhodné tento spínač implementovat.

Warping: Tento jev je velice obtížné detekovat ve svém počátku. Dochází k postupnému oddělování objektu od tiskové podložky. Warping by mohlo být možné detekovat pomocí algoritmů založených na zpracování obrazu. Definovaný bod na okraji objektu by byl sledován v rámci osy Z. Pokud by došlo k jeho posunu o určitou výšku, program by situaci vyhodnotil jako warping. Součástí vyhodnocovacího systému by musela být kamera, která by byla pevně fixována k tiskové podložce. Kamera by musela mít rozlišení, aby byla schopná detekovat malé změny v rámci milimetrů. Pokud by například byla zvolena kamera s objektivem s ohniskovou vzdáleností 105 mm a zorným úhlem 19,5° a warping o posunu 1 mm by byl detekován ve vzdálenosti 105 mm, musel by být počet pixelů kamery v daném směru minimálně 360, pokud by bylo požadováno 10 px na 1 mm. Je nutné také počítat s vibracemi v průběhu tisku. Další problém je, že není známo, která část objektu by se začala odlepovat od tiskové podložky. Nejčastěji k warpingu dochází v rozích objektu, kde se setkávají 2 strany. Tažné napětí, vlivem chladnutí, vyvíjené na obou stranách způsobuje deformaci a zatažení rohu objektu směrem nahoru a dovnitř. [42] V případě, že styčná plocha objektu je nepravidelná a obsahuje mnoho hran a vrcholů, je obtížné definovat bod, který bude sledován. Je tedy nutné sledovat celý obvod styčné plochy, což vyžaduje také větší počet kamer, rozmístěných okolo objektu, popřípadě kameru, která bude rotovat okolo objektu.

Další možnost je implementace pole optické závory ve 2 na sebe kolmých osách na tiskovou podložku. V místě tisknutého objektu budou závory definované v poloze detekce objektu. Pokud dojde k warpingu, část pole závor změní svůj stav. To ovšem není vhodné řešení, jelikož

warping u nepravidelných předmětů může nastat i v místě, jehož zvýšení neumožní vizuální kontakt senzorů.

Nejhorší možným následkem warpingu je celkové uvolnění objektu z tiskové podložky, čímž je tisk nenávratně ztracen, navíc to může být spouštěcí impuls pro další chyby. V případě uvolnění objektu lze opět použít kamerový systém či systém optických závor. Není zde již požadavek tak velkého rozlišení, jelikož je sledovaný celý objekt. Čím větší objekt, tím lépe může být sledován. Při vhodně zvolené konstrukci tiskárny postačí pouze jedna kamera, umístěna v dostatečné vzdálenosti nad tiskovou podložkou. [43]

Posun vrstev lze detekovat podobně jako warping. Navíc zde lze implementovat sledování trysky. Pokud se tryska nenachází na správných souřadnicích vzhledem k tiskové podložce, pravděpodobně došlo k posunu vrstev. K tomuto účelu by šla využít termální kamera, která by sledovala trysku na základě její teploty.

Ucpání trysky - V případě, že z trysky nevychází žádný materiál, mohlo dojít k jejímu ucpání. To je možné detekovat na mezeře, která bude vznikat mezi tryskou a tisknutým objektem. Pokud tedy dojde k oddělení trysky od chladnoucího objektu, lze prohlásit, že došlo k chybě. Zde je opět možné využít termální kameru.

Přírůstek vrstev dle modelu - Výška tiskové vrstvy se běžně pohybuje od 0,05 mm do 0,5 mm. Vzhledem k rozličnosti tvarů tiskových objektů je jednou z možností vytvořit prostorový obraz právě tisknutého modelu, který bude porovnáván s návrhem virtuálního modelu.

Prostorový obraz lze získat pomocí 3D skenerů, nebo fotogrammetrií. Fotogrammetrie získává obraz fyzického objektu z několika snímků objektu v různých polohách. Z bodů, jejichž poloha je známá, lze dopočítat prostorovou polohu zobrazovaného předmětu. Měří se snímkové souřadnice bodu na snímku a horizontální paralaxa.

3D laserové skenování je technologie, při níž je fyzický tvar objektu převeden na digitální pomocí triangulace.

Laserová triangulace je stereoskopická technika, kde je vzdálenost objektu vypočtena pomocí rozkmitávaného laserového paprsku a kamer. Laserový paprsek je promítán na povrch snímaného tělesa, kde jej snímají kamery. Kamery jsou umístěny ve známé poloze vůči skeneru a lze pomocí trigonometrie vypočítat 3D prostorové (XYZ) souřadnice bodů povrchu. Kamery zaznamenávají průměty laseru na povrch a digitalizují všechny body z laserové čáry. [44] Další možnost, jak zjišťovat přírůstek vrstev je odlišení jednotlivých vrstev. Odlišení může být provedeno například barvou, kdy se barva vrstev střídá v pravidelných intervalech. Kamera, umístěná nad tiskovou podložkou, následně porovnává oblast právě natisknuté vrstvy s tiskovými daty. Barevné rozlišení vrstev je z důvodu toho, aby se zamezilo splynutí vrstev, a tím pádem i chybnému vyhodnocení. Tento model není ovšem vhodný, jelikož ho lze použít pouze na objekty, jejichž vrstvy se dokonale překrývají. [45]

4 Sestavení 3D tiskárny a implementace kontrolního mechanismu

Původní plán byl pokračovat na rozvoji 3D tiskárny, která byla k dispozici. Tato tiskárna byla sestavena v roce 2013, jednalo se o starší model. Tiskárna nakonec byla shledána jako nevhodná z důvodu špatné tuhosti konstrukce, nevhodně řešených koncových spínačů, špatně zvoleným budičům a špatnému extruderu.

Požadavky na tiskárnu

- pořizovací cena do 10 000 Kč
- rychlá možnost modifikací přístroje
- možnost výměny tiskové hlavy
- možnost kalibrace osy Z
- robustní konstrukce
- kompatibilita se vzdáleným hostitelským softwarem

Byla navržena kompletně nová FDM 3D tiskárna, vycházející z nejnovějších modelů značky PRUSA a tiskáren známých pod názvem REBEL. Tiskárna byla úspěšně sestavena a oživena.

4.1 Návrh těla 3D tiskárny

Jako základní rám tiskárny byl zvolen model „oboustranné L“, který umožňuje dobrý přístup k jednotlivým částem tiskárny a snadnější manipulaci. Rám je tvořen z hliníkových profilů (Norma EN 573-3). Tyto profily umožňují snadné připojení částí 3D tiskárny a dalších periférií. Podpůrné objekty, které drží jednotlivé části jsou tištěné z materiálů PET-G a PLA. Celkové rozměry tiskárny jsou (340 x 380 x 400) mm (šířka x hloubka x výška). Maximální oblast tisku je (200 x 200 x 220) mm (šířka x hloubka x výška).

Hliníková tisková podložka o rozměrech (214 x 214) mm a výšce 3 mm je vyhřívána pomocí odporového drátu o celkovém odporu 2 Ω . Napájecí napětí je 12 V. Uprostřed vyhřívané podložky je umístěn termistor 100 k Ω pro regulaci teploty. [46] Podložka se pohybuje pomocí jednoho krokového motoru SX17-0905 ve směru osy Y za pomoci řemene GT2.

Pohyb pojízdné jednotky ve směru osy Z probíhá pomocí 2 krokových motorů SX17-0905, které jsou pevně připojeny k rámu. Pohyb probíhá rotací závitových tyčí M6.

Pohyb pojízdné jednotky ve směru osy X zajišťuje krokový motor SX17-0905 řemenovým převodem

Výrobce	Microcon
Délka kroku	1,8°
Příruba	NEMA 17
Statický moment	0,6 Nm
Jmenovitý proud	0,88 A

Tabulka 2 Vlastnosti krokového motoru SX17-0905 [47]

4.2 Návrh tiskových hlav

Cíl je vyvinout tiskovou hlavu, která bude schopná tisknout kromě filamentů také jiné materiály, v nestandardizované formě či různých skupenstvích. Vzhledem k povaze různých materiálů je velice obtížné vyvinout extrudér, který by byl schopen tisknout z jakéhokoliv materiálu. Musel by obsáhnout schopnosti pro tisk materiálů různých skupenství, teplot, apod.

K problému je přistoupeno tak, že bylo vytvořeno více extrudérů, kdy každý bude mít schopnosti tisknout z určitého materiálu. Byl kladen důraz na to, aby výměna extrudérů byla co nejjednodušší. Došlo k rozdělení pojízdné jednotky a extrudéru. Extrudér a pojízdná jednotka jsou společně spojeny pouze pomocí neodmývacích magnetů.

Kalibrace vzdálenosti tiskové podložky od osy Z probíhá pomocí indukčního přibližovacího senzoru DC 5V NPN NC LJ8A3-2-Z, s axiální vzdáleností 2 mm. [48] Uživatel před začátkem tisku zvolí, jakou hlavu bude používat. Hlavu následně nasadí na pojízdnou jednotku a zapojí příslušné kabely do řídicí jednotky.

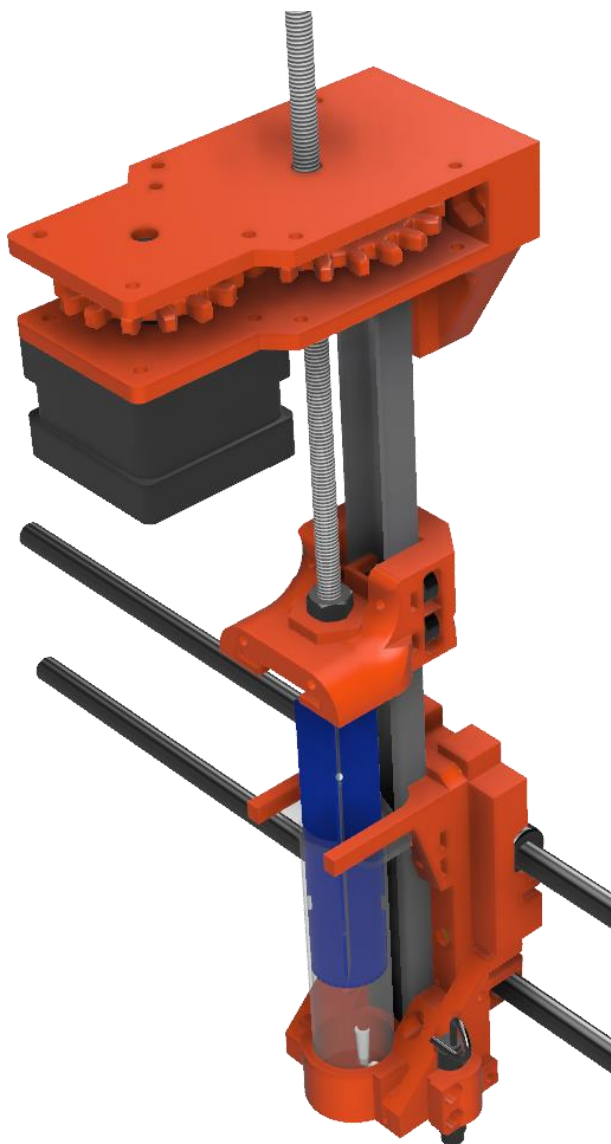
4.2.1 Extruder na filament

Tento extrudér vychází z extrudéru u tiskáren PRUSA MK2. Je vybaven topným tělesem o výkonu 40 W regulovaným pomocí termistoru 100 k Ω , tryskou o průměru 0,4 mm, větráčkem na chlazení těla extrudéru a větráčkem na chlazení tisknutého objektu. Filament o průměru 1,75 mm je vháněn do extrudéru pomocí krokového motoru SX17-0905.

Extrudér byl zkušěn na materiály PLA, PET-G a ABS.

4.2.2 Extrudér na kapalné materiály

Tento extrudér byl speciálně navržen pro tisk z materiálů s gelovou konzistencí, jako je například silikon. Návrh probíhal v CAD software Fusion 360, jehož licence je volně dostupná studentům ČVUT.



Obrázek 18 Návrh extrudéru ve Fusion 360

Materiál se nejprve ručně nasaje do injekční stříkačky, která se posléze umístí do extrudéru. Pomocí krokového motoru SX17-0905 a ozubených kol v poměru 14:22 následně dochází přes závit M6 k převodu rotačního pohybu na pohyb posuvný. Maximální kapacita injekční stříkačky je 24 ml, což je také maximální množství materiálu, z kterého je možné v jedné tiskové úloze vytvořit objekt. Hladký posun zajišťují ložiska, která se posouvají po hliníkovém profilu tvaru „U“

Bylo třeba vypočítat parametry pro implementaci do *slicovacího* software.

Výpočet počtu kroků motoru pro posun pístu o 1 mm:

$$\begin{aligned} \text{počet kroků na 1 mm} &= \frac{\text{počet kroků na } 360^\circ \cdot \text{mikrokroky}}{\text{stoupání závitu M6} \cdot \text{převod ozubených kol}} = \\ &= \frac{200 \cdot 32}{1 \cdot \frac{14}{22}} = 10\,057,14 \end{aligned}$$

Délka vytlačeného materiálu při posunu pístu o 1 mm:

$$\text{délka materiálu} = \frac{\text{poloměr injekční stříkačky}^2 \cdot \text{posun pístu}}{\text{poloměr trysky}^2} = \frac{10^2 \cdot 1}{1,1^2} = 82,6 \text{ mm}$$

S vypočtenými parametry byl vytvořen nový tiskový profil pro volně dostupný SlicerPE.

Nevýhoda tohoto extrudéru je jeho hmotnost, která se navíc mění v průběhu tisku s tím, jak je materiál vytlačován ze stříkačky. Proto je vytvořený tiskový profil nastavený na nízké rychlosti tisku. Je zde také limitované množství materiálu, které je dáno kapacitou injekční stříkačky. Původně byl extrudér navržen pouze za pomoci dílu vytištěných na 3D tiskárně (nepočítaje elektronické části) kvůli udržení co nejnižší hmotnosti. Docházelo však k problémům, kdy se plastový materiál ohýbal a píst injekční stříkačky se pohyboval chybně. Po nahrazení těchto komponentů ocelovou závitovou tyčí M6 a hliníkovým profilem byly problémy odstraněny a tisk probíhá v pořádku.

4.3 Návrh kontrolního mechanismu

4.3.1 Využití termální kamery a vytvoření ovladače

Pro kontrolu a analýzu tisku byla zvolena metoda pozorování pomocí termální kamery. Termální kamera na základě termálních snímků dokáže sledovat v reálném čase průběh tisku a dokáže vyhodnocovat různé situace. Z jednoho zdroje je tak možné získat několik různých parametrů. Navíc lze využít pro další výzkum v oblasti 3D tisku. Není známo, že by tento postup byl v oblasti 3D tisku aplikován, výsledky proto není možné porovnat.

Všechny objekty s teplotou větší než absolutní nula vyzařují energii ve formě elektromagnetického záření. Intenzita elektromagnetického záření vyzařovaného povrchem daného objektu je závislá na povrchové teplotě objektu. Změřením intenzity tohoto záření tak lze určit povrchovou teplotu objektu. Zdrojem tohoto elektromagnetického záření je termický pohyb částic, z nichž je objekt složen a nazývá se tepelné záření. [49]

Stefan-Boltzmannův zákon

Intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa

$$I = \epsilon k T^4 \quad [50]$$

kde $k = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{)}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta, I celková intenzita záření (W m^{-2}), ϵ emisivita tělesa, $\epsilon \in < 0,1 >$ (I je emisivita absolutně černého tělesa), T termodynamická teplota (K)

Pokud je známá emisivita předmětu, jeho teplota v Kelvinech a velikost povrchu, lze vypočítat vyzářený výkon ve Wattech

Wienův posunovací zákon

Se změnou povrchové teploty objektu dochází ke změně spektrálního rozložení vyzařovaného výkonu. S rostoucí teplotou se maximální intenzita vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. To je definováno vztahem

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad [50] \quad ,$$

kde λ_{max} je vlnová délka, na které je maximální intenzita vyzařování (m), b je Wienova konstanta, $b = 2,898 \text{ (mm} \cdot \text{K)}$ a T je teplota tělesa (K).

Při teplotě $525 \text{ }^\circ\text{C}$ (tzv. Drapertův bod) se vlnové délky začínají vyskytovat i ve viditelném spektru.

Planckův vyzařovací zákon

Planckův vyzařovací zákon určuje, kolik energie se vyzáří na jednotlivých vlnových délkách. Pro černé těleso, které má emisivitu rovnou jedné, je tato spektrální závislost funkcí pouze povrchové teploty.

$$dI = \frac{h\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1} d\omega \quad [50]$$

Kde ω je úhlová frekvence záření (rad s^{-1}), I je intenzita záření (W m^{-2}), T je teplota absolutně černého tělesa (K), \hbar je redukovaná Planckova konstanta, $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054571800 \cdot 10^{-34} \text{ (J s)}$, c je rychlost světla ve vakuu, $c = 299\,792\,458 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$, k je Stefan-Boltzmannova konstanta. ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

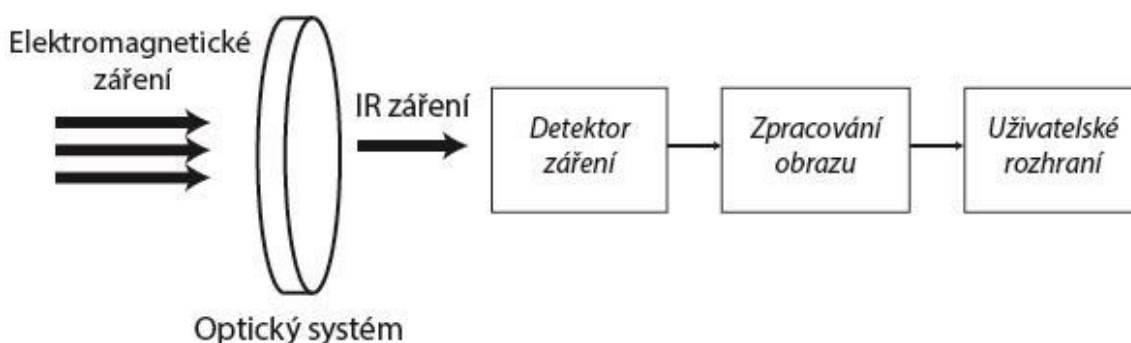
Emisivita

Emisivita je efektivita vyzařování. Nabývá hodnot od 0 po 1, kdy 1 je pro absolutně černé těleso. Reálný objekt má vždy menší emisivitu než 1, znamená to, že při stejné povrchové teplotě jako má absolutně černé těleso, vyzaří reálný objekt méně tepelného záření.

Je-li emisivita považována za konstantní, tj. nezávislou na vlnové délce, jedná se poté o tzv. šedé těleso. Ve skutečnosti je ale emisivita vždy závislá na vlnové délce a všechny reálné předměty jsou tzv. selektivní zářiče.

4.3.2 Konstrukce termokamery

Konstrukce termokamery je podobná konstrukci klasického fotoaparátu či kamery. Tepelné záření je promítáno objektivem na čip, kde dochází ke změření intenzity záření. Následně se provede zpracování signálu ve výsledný snímek, který se nazývá termogram. Termogram obsahuje informaci o povrchovém rozložení teploty na objektu. Rozlišení termogramu je dáno rozlišením čipu termokamery.



Obrázek 19 Blokové schéma termokamery

Elektromagnetické záření prochází optickým členem, který je často tvořen z germánia. Na povrchu čočky bývá nanesena antireflexní vrstva, která zabraňuje odrazu infračerveného záření na povrchu čočky. Propustnost čočky se pohybuje okolo 90 %. Optický systém filtruje širokopásmové elektromagnetické záření dopadající na povrch čočky a propouští pouze záření požadovaných vlnových délek.

Detektor záření je senzor, který převádí dopadající infračervené záření na elektrický signál, který je dále zpracováván. Existují 2 typy detektorů – tepelné a fotonové. Fotonové detektory pracují na principu sumace dopadených kvant záření na daný čip. Tyto detektory je zapotřebí chladit. Jedná se o velice přesné a finančně náročné detektory. Druhým typem je tepelný detektor, který funguje

na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Chlazení zde není nutné, ale pro přesnější měření je možné jej aplikovat také. Často využívaný tepelný detektor je tzv. bolometr, který mění svůj elektrický odpor v závislosti na množství dopadajícího záření. Vytváří se mikrobolometrické pole, což je matice, která je tvořena velkým množstvím mikrobolometrů rozmístěných do 2D pole. Velikost strany pole se pohybuje okolo 1-2 cm a velikost jednoho mikrobolometru je v řádu jednotek mikrometrů.

Dochází k ohřívání bolometru, proto musí být tento typ detektoru vybaven automatickou uzávěrkou, která kontroluje množství dopadajícího záření na daný detektor. Pro zpracování dat z detektoru je zapotřebí dostatečně výkonný procesor, který zajišťuje zpracování obrazu, autokalibraci kamery a další korekce obrazu.

Parametry termokamery

- **Teplotní rozsah** – udává, v jakém teplotním intervalu je kamera schopná změřit teplotu.
- **Spektrální rozsah** – rozsah vlnových délek, v němž kamera zaznamenává záření. Tradiční hodnota je 8 μm až 14 μm
- **Přesnost určení teploty** – přesnost, s jakou kamera určí změřenou teplotu objektu.
- **Teplotní citlivost** – určuje, jak šum ovlivňuje výsledný snímek. Vyjadřuje se pomocí parametru NETD, který popisuje nejmenší rozdíl teplot, který vyvolá signál větší, než je vlastní šum systému. Udává se ve stupních Celsia či v Kelvinech a říká, jaké nejmenší rozdíly teplot na absolutně černém tělese je možné kamerou detekovat. Pohybuje se v desítkách mK
- **Rozlišení** – rozlišení je dáno počtem prvků (například) mikrobolometrů, na které dopadá záření. Vyjadřuje se v pixelech, kdy každý pixel reprezentuje jeden prvek.
- **Optika** – optika určuje zorný úhel kamery (může se lišit v horizontálním a vertikálním směru), možnost ostření a typ čočky.

4.3.3 Výběr termokamery

Pro účely této práce bylo zapotřebí použít kameru, která bude splňovat následující předpoklady:

- Teplotní rozsah minimálně (20 – 300) °C
- Přesnost určení teploty v rozsahu jednotek °C
- Možnost získání dat z kamery a jejich následné zpracování
- Rozlišení v řádu alespoň stovek pixelů
- Optika pro zaostřování
- Pořizovací cena do 10 000 Kč

Model kamery / Parametr	<u>SEEK THERMAL COMPACT</u>	SEEK THERMAL COMPACT PRO	FLIR ONE PRO	FLIR Radiomet- ric Lepton
Teplotní rozsah (°C)	od -40 do +330	od -40 do +330	od -20 do +400	od -10 do +140 nebo od -10 do +450
Rozlišovací schop- nost (°C, %)	±2 °C	-	±3 °C nebo ±5 %	±5 °C nebo ±5% při vyšší citlivosti nebo ±10 °C nebo ±10% při nižší citlivosti
Rozlišení (px)	206 x 156	320 x 240	160x120	80 x 60
Optika	autofokus, manu- ální	autofokus, manuální	autofokus	autofokus
Cena (Kč)	6 500,00	13 000,00	12 000,00	5 520,00
Oficiální podpora pro OS	Android, iOS	Android, iOS	Android, iOS, Win- dows	Vývojový kit pro Raspberry - od- nože Linux
Velikost pixelu (µm)	12	12	-	17
Zorný úhel (°)	36	32	55 x 43	51 x 66
Ohlisková vzdále- nost (cm)	10,0	9,4	-	10,0
Frame rate (Hz)	9,0	15,0	8,7	8,6
Wavelength (µm)	7,2-13	-	-	8,0-14,0
Typ senzoru	Vanadium oxyde, nechlazený micro- bolometer	-	-	Vanadium oxyde, nechla- zený mikrobole- metr
Teplotní citlivost (mK)	70	70	70	<50
Další informace	-	-	+ klasická kamera	prodej pouze v USA

Tabulka 3 Porovnání parametrů termokamer

Z porovnávaných modelů byla nakonec vybrána termální kamera SEEK THERMAL COMPACT, která nejvíce vyhovuje požadavkům práce. Její nevýhodou je absence ovladače pro operační systémy používané v klasických počítačích, který byl v rámci práce vytvořen.

4.3.4 SEEK thermal Compact

Základní parametry kamery jsou v Tabulka 3 *Porovnání parametrů termokamer*, zde bude rozebrán její detailnější popis.

Termokamera SEEK Thermal Compact je původně určena pouze pro mobilní telefony a tablety s OS Android nebo iOS. Rozměry kamery jsou 45 x 18 x 20 mm (šířka x výška x hloubka) a hmotnost 22 g.



Obrázek 20 SEEK Thermal Compact (převzato z [51])

Oficiální dokumentace není z důvodu komerčního užití kamery dostupná, výrobce nebyl ochoten poskytnout detailnější údaje. Následující údaje jsou experimentálně zjištěny. [52]

Kamera je autonomní, co se týče poskytování dat. Odlišné typy snímků je možné sledovat pomocí pozice 20 v obdrženém snímku, který kamera vysílá přes USB. Díky elektromechanické závěrce kamera provádí automatickou kalibraci. Závěrka je ovládána magneticky pomocí cívky. Objektiv typu fix focus je tvořen z chalkogenidových čoček UMICORE vložených v zinkovém pouzdře. Výroba chalkogenidu je výrazně levnější na výrobu, zejména u větších objektivů. Chalkogenid nemění rychlost přenosu s rostoucí teplotou, oproti čistému germaniu. Čiřost je však oproti germaniu horší. Navíc je kamera vybavena druhou čočkou, která umožňuje manuální ostření. [53] [54]

Snímek kamery

Každá vyslaná matice dat (snímek) je tvořena z 32448 16bitových slov, reprezentujících 208 x 156 pole. Každé slovo je přenášeno jako little-endian hodnota. Používá se pouze 14 bitů ze 16. Snímek neobsahuje hlavičku, specifická data jsou uložena na hodnotách některých pixelů. Jedna matice dat je posílána na vyžádání USB hostilele rychlostí 9 fps. Některé snímky obsahují místo obrazových dat data kalibrační. Poslední 2 hodnoty v každé řadě nejsou nikdy obrazová data. Ve sloupci 207 kontrolní součet hodnot v daném řádku. Sloupec 208 obsahuje pouze nuly. Od 10. pixelu každý patnáctý pixel je zatemněný kvůli konfrontaci s patentem FLIR. 10. pixel obsahuje informace, pomocí nichž lze snímky rozřadit do určitých typů (ID). V ostatních zatemněných pixelech jsou uložena metadata.

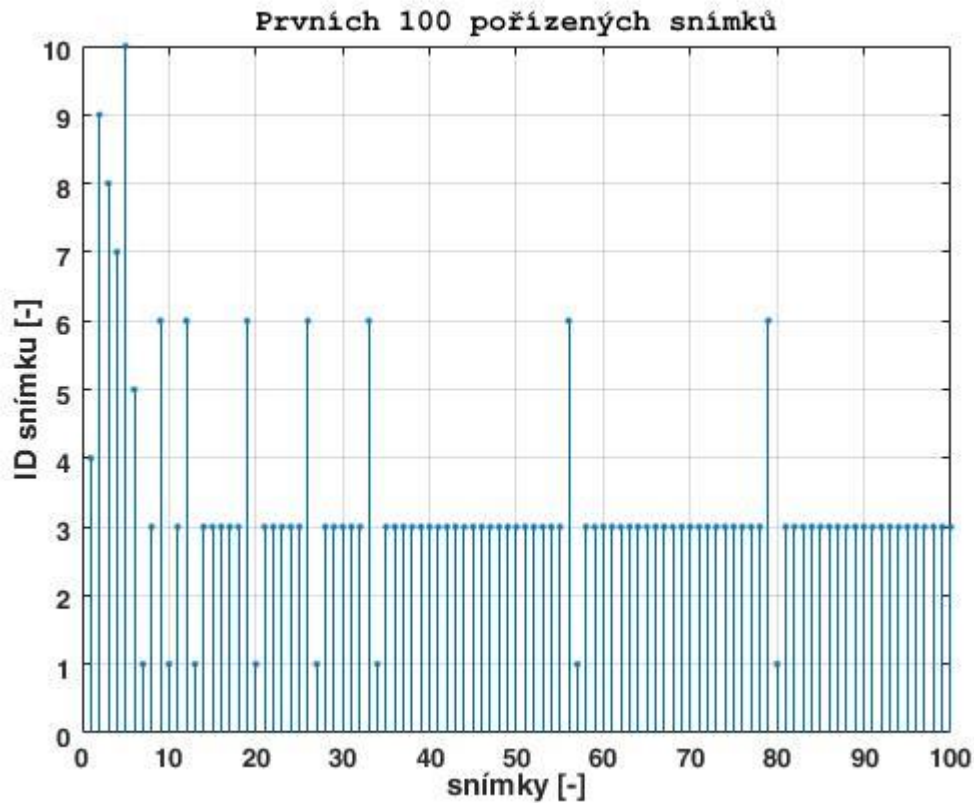
Je celkem 9 typů snímků, které kamera vysílá. Každý typ (ID) obsahuje specifická data. Bohužel neexistuje oficiální dokumentace, která by přesně definovala daný typ (ID), nicméně experimentálně byl odhadnut obsah některých snímků.

ID vysílaných snímků byla postupně zaznamenávána v časovém úseku 20 minut. Byla provedena tři opakování. V prvním případě byla termokamera namířena na statickou scénu - bílou zeď, ve druhém a třetím případě byla zaměřena na dynamickou scénu - 3D tiskárnu, kde právě probíhal tisk. Počty jednotlivých snímků jsou v Tabulka 4.

ID snímku	výskyt [-]		
	měření 1	měření 2	měření 3
1	221	220	220
2	-	-	-
3	9047	9050	9048
4	1	1	1
5	1	1	1
6	220	219	219
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	1	1	1

Tabulka 4 Výskyt snímků různých ID v prvních 20 minutách

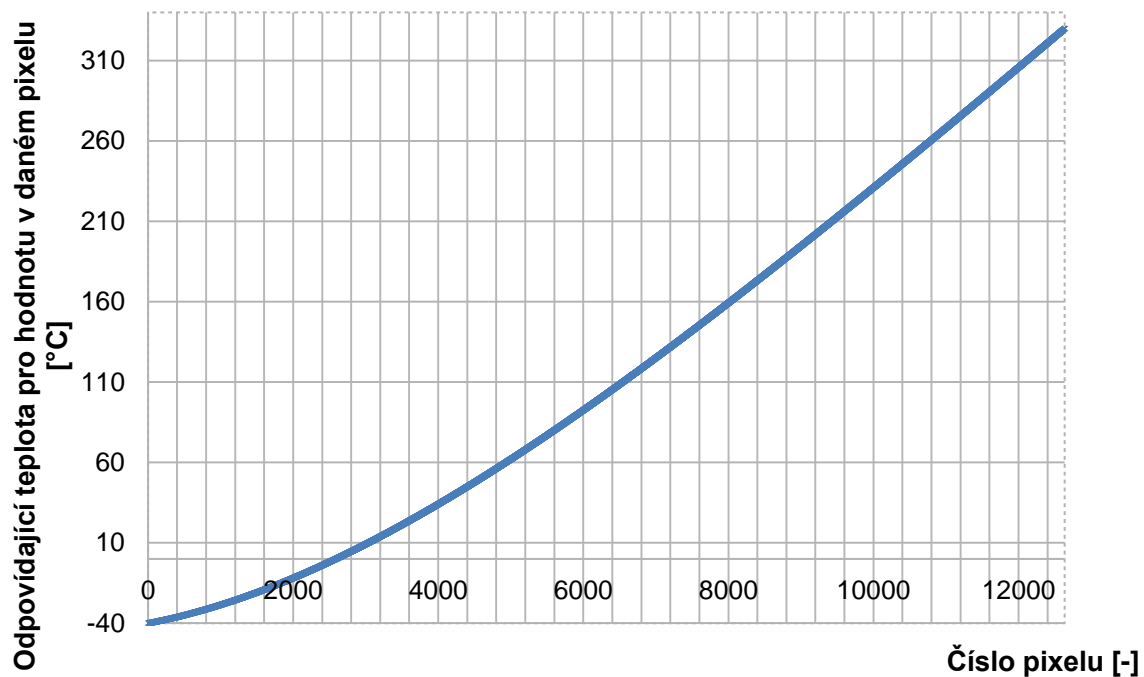
Z tabulky lze vyvodit, že snímaná scéna nemá vliv na výskyt jednotlivých snímků a nejčastější je snímek s ID 3, který obsahuje termální data.



Obrázek 21 Prvních 100 pořizených snímků

Na Obrázek 21 je zobrazeno ID prvních 100 snímků. Nejprve je vyslána sekvence snímků s ID 4,9,8,7,10,5. Tyto snímky už se poté nevysílají. Snímek s ID 9 obsahuje převodní charakteristiku, pomocí které se počítá teplota. Data obsahují hodnoty od 2000 do 12638. Na Obrázek 22 jsou pro znázornění přepočtené bitové hodnoty na teploty, odpovídající rozsahu od -40 do 330° C.

Převodní charakteristika mikrobolometru

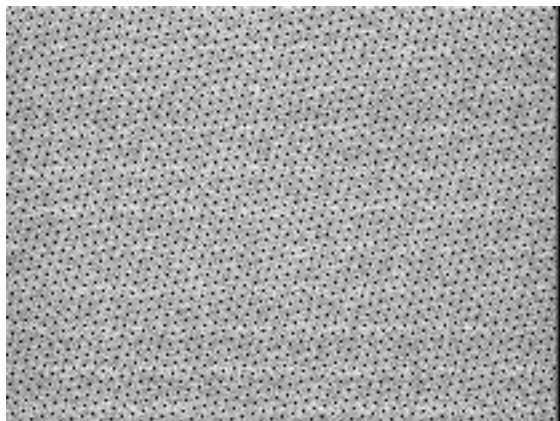


Obrázek 22 Převodní charakteristika mikrobolometru

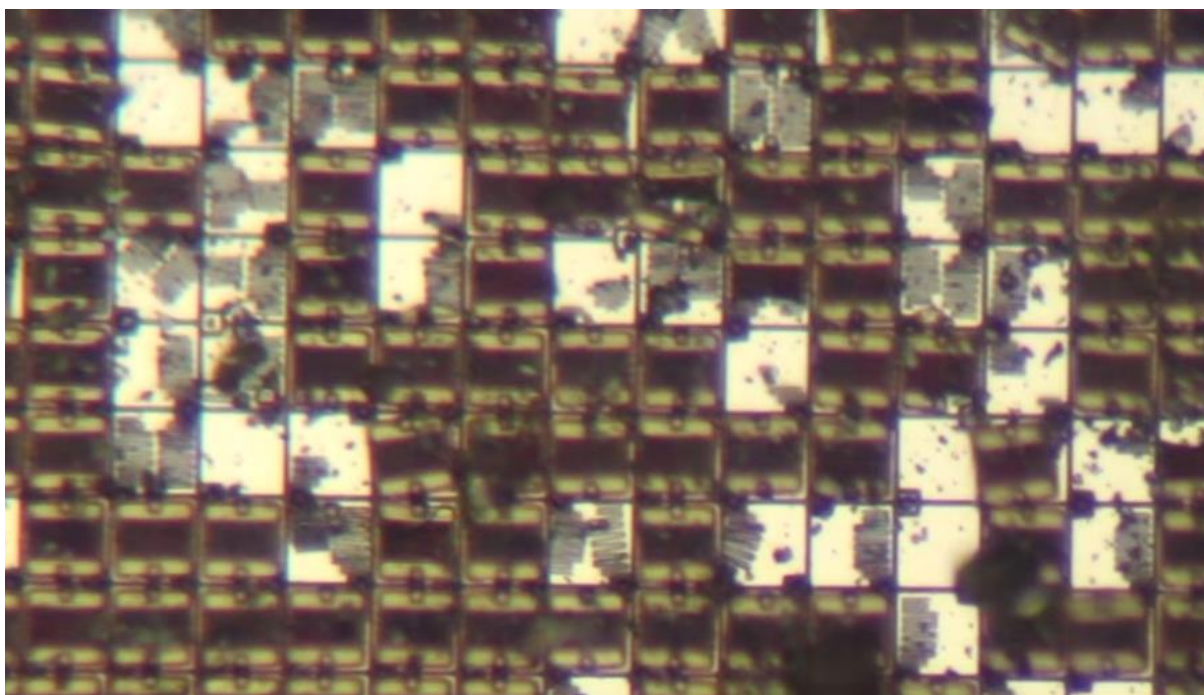
Snímek s ID 3 obsahuje termální data, jeho četnost je nejvyšší a postupně se zvyšuje frekvence těchto snímků.

Snímek s ID 1 se vyše vždy, když závěrka zakrývá senzor, obsahuje pravděpodobně kalibrační data. V programu je odečítán od snímku s teplotní a obrazovou informací [52]

Snímek s ID 6 vždy předchází snímku s ID 1. Význam tohoto snímku je neznámý, je možné, že se jedná o prekalibrační data. V programu není použit.



Obrázek 23 Snímek s ID 1



Obrázek 24 Pohled mikroskopem na poškozené pole mikrobolometrů z SEEK Thermal Compact (převzato z [55])

4.3.5 Realizace ovladače pro SEEK Thermal Compact

Pro termální kameru byl dle informací z [52] napsán ovladač v jazyce python. Program lze rozdělit na několik částí. Nejprve program vyhledá kameru a nastaví příslušné porty, poté se pošlou instrukce, které inicializují termokameru. Termokamera poté zahájí vysílání jednotlivých snímků. Snímky jsou zpracovávány dle jejich ID. Po úvodní inicializační sekvenci snímků se začne opakovat vždy posloupnost snímku s následujícími ID: jeden snímek s ID 6 poté jeden snímek s ID 1 a následuje několik snímků s ID 3. Tato sekvence se opakuje až do ukončení komunikace.

Snímky jsou zaznamenávány a dle ID zpracovávány následovně:

Data ze snímku s ID 9 jsou po inicializační proceduře trvale uložena do paměti. Data z posledního obdrženého snímku s ID 1 jsou vždy odečítána od dat ze snímků s ID3 až do té doby, než je obdržen nový snímek s ID 3. Přepočítání teploty ze snímků s ID 3 pomocí snímku s ID 9 je prováděno v externím skriptu, který je napsán v jazyce C. Je to z důvodu zrychlení procesu, protože v jazyce python byl výpočet pomalý.

Po vytvoření matice teplot se provede normalizace a 8bitové škálování, tak že nejvyšší teplotě ve snímku je přiřazena hodnota 255 a nejnižší teplotě hodnota 0. Tato data jsou poté převedena do černobílé škály pomocí knihovny OpenCV a je rekonstruován termální obraz.

Teplotní data

s definovanou frekvencí postupně se společně s časovým razítkem ukládají jako řádkové vektory do formátu .csv. Korekce černých pixelů v obrazu (kolize s patentem FLIR) jsou jednoduše nahrazena teplotou předcházejícího pixelu. Bylo vyzkoušeno i vytvoření teploty jako průměr okolních pixelů. Vedlo to ovšem pouze k další zátěži procesoru.

Zhruba 1 % pixelů zobrazuje posunuté hodnoty. Jedná se o posun přibližně o 10 °C až 20 °C v obou směrech. Byla tedy vytvořena možnost kalibrace, která probíhá tak, že se kamera nechá alespoň 20 minut snímat teplotně homogenní pole – například bílou zeď. Poté se uloží série deseti po sobě jdoucích snímků s ID 3 a vypočítá se průměrná hodnota pro všechny pixely. Následně se určí medián. Ten je odečten od všech hodnot. Data jsou uložena do souboru cal-file.txt. Při dalším spuštění termokamery jsou tato data odečítána od každého snímku, čímž dojde k posunutí špatných pixelů do správné oblasti.

Bylo experimentováno i se snímky s dalšími ID, nebylo dosaženo žádných použitelných výsledků. Data ze snímku s ID 10 a ID 6 by pravděpodobně mohla být použita pro další kalibraci, to je ovšem předmětem dalšího výzkumu. Pro účely programu stačí data ze snímků s ID 1, ID 3 a ID 9.

V každém snímku je na pozici 2 údaj o teplotě uvnitř kamery. Korekce výsledné teploty je prováděna dle [52].

Při vývoji programu byly měřené hodnoty teplot testovány vzhledem k teplotě pokožky lidského těla a pokojových teplot, kdy termokamera při dokončení programu měřila s přesností 1 °C.

4.3.6 Implementace pluginu do Octoprint

Jak již bylo zmíněno, pro Octoprint je možné vytvářet zásuvné moduly (pluginy), které rozšiřují jeho funkčnost. Návod na implementaci je popsán v dokumentaci [56]. Předpokládá se, že programátor ovládá jazyk python, html, css a javascript.

Bylo vytyčeno několik požadavků, které by měl plugin dokázat:

- Streamování a vytvoření nahrávky z termokamery
- Možnost spustit kalibraci pro korekci posunutých hodnot některých pixelů
- Teplotní hlídač

Velký problém byl vyřešení paralelního řízení termokamery a Octoprintu. To bylo vyřešeno tzv. multithreadingem, znamená to, že v jednom okamžiku je možné pomocí nezávislých vláken provádět paralelně více procesů. Bylo potřeba ošetřit správné vytváření a ukončování vláken. Byla použita knihovna threading. [57]

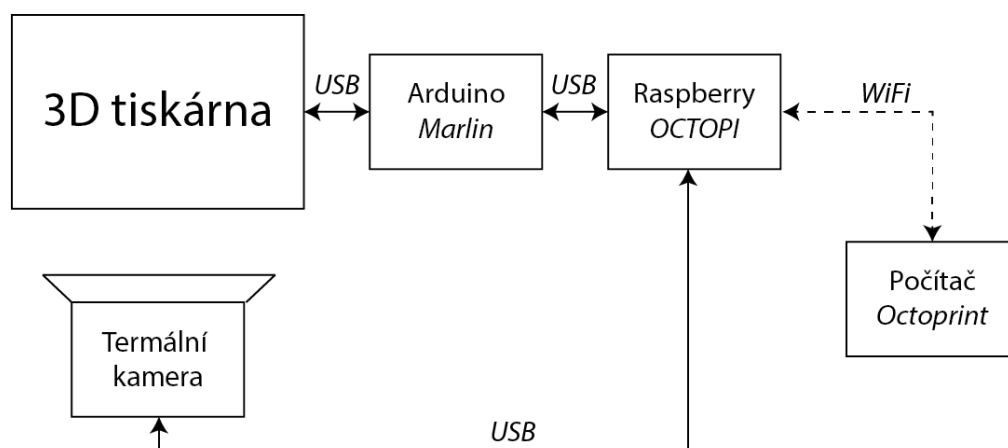
Rozhraní pro tvorbu pluginů poskytuje pouze omezený přístup k funkcionalitě Flasku [58], což velmi komplikuje implementaci klasických metod streamování. Vzhledem k malému datovému toku je však možné obraz poskytovat pasivně. Jádru pluginu vystavuje na adrese "/static/images/video_feed" aktuální kamerový snímek ve formě statického png obrázku. Jeho obsah je periodicky aktualizován vláknem ovládajícím kameru. Fyzické zapisování těchto dočasných dat na disk by vytvářelo zbytečnou latenci. Data jsou proto uložena pouze v paměti a interface souboru jim poskytuje opencv wrapper "imencode" [59]. Díky němu lze obraz odesílat standardní metodou Flasku. Zobrazení dalšího snímku je plně v režii klienta - v tomto případě JavaScriptu, importovaného do webového rozhraní Octoprintu. Pokud klient detekuje spuštění kamery, začne se v nastaveném intervalu dotazovat na obsah souboru. Aby se zamezilo použití cache, přidává se k url proměnná s aktuálním časovým razítkem.

Kalibrace je inicializována po stisknutí tlačítka „Calibration“, kdy se přes klienta zavolá příslušná funkce z ovladače termokamery.

Teplotní hlídač neustále kontroluje maximální naměřenou teplotu termokamery. Pokud teplota překročí uživatelem definovanou mez, inicializuje se protokol, který je schopný měnit G-code a přerušit aktuální vykonávané instrukce Marlinem. Do Marlinu je zaslán příkaz, který si uživatel definuje v pluginu.

Plugin je možné provozovat pouze na linuxových platformách. Plugin byl pojmenován „Thermo Analyzer“.

4.3.7 Realizace navrženého systému



Obrázek 25 Blokové schéma navrženého systému

3D tiskárna přijímá příkazy pomocí Firmware Marlin verze 1.1.9, provozovaném na Arduino MEGA2560. Do něj jsou příkazy sekvenčně posílány přes USB z Raspberry Pi 3 model B, operující pod systémem OCTOPI. Octopi zároveň přijímá data z Marlin. K Raspberry je přes USB připojena také termální kamera, která v reálném čase sleduje 3D tiskárnu a průběh tisku a komunikuje s Raspberry. Celý systém je uživatelem sledován a řízen ze vzdáleného počítače, který komunikuje s Raspberry přes WiFi pomocí Octoprint.

4.3.8 Ověření SEEK Thermal pomocí termokamery FLUKE Ti25

Pro zjištění přesnosti měření teploty pomocí kamery SEEK Thermal Compact byl navržen a realizován experiment. Varná plotýnka typu Sencor s výkonem 1500W byla postupně zahřívána a její termální obraz v časovém intervalu zaznamenáván současně pomocí Termokamery SEEK Thermal Compact a profesionální termokamery FLUKE Ti25, která sloužila jako referenční.

Parametr	FLUKE Ti25
Teplotní rozsah (°C)	od -20 do 350
Rozlišovací schopnost (°C, 5)	±2 °C nebo ±2 %
Rozlišení (px)	160 x 120
Optika	autofocus, manuální
Cena (Kč)	120000
Oficiální podpora pro OS	Windows
Velikost čipu (µm)	-
Zorný úhel (°)	23 x 17
Ohnisková vzdálenost (cm)	15
Frame rate (Hz)	9
Wavelength (µm)	7,5 - 14
Typ senzoru	nechlazený microbolometer
Teplotní citlivost (mK)	<50

Tabulka 5 Parametry termokamery FLUKE Ti25

Kamera SEEK Thermal Compact byla fixována ve vzdálenosti 50 cm nad plotýnkou, kamera FLUKE díky svým rozměrům a ceně byla kvůli bezpečnosti ovládána ručně v řádově stejné vzdálenosti. Kamera SEEK Thermal Compact byla ovládána dálkově přes vytvořený plugin do Octoprintu, který dokáže vytvářet videozáznam ve formátu .avi a pořizovat teplotní data ve formátu .csv. Data byla ukládána na pevný disk počítače. Octoprint byl provozován přes localhost.

Měření probíhalo tak, že byl nejprve spuštěn záznam termokamery SEEK, následně se spustilo vyhřívání plotýnky na plný výkon a poté se ručně v krátkých nepravidelných intervalech (1-5 s) zaznamenávaly jednotlivé termální snímky pomocí termokamery FLUKE až do naměření teploty 350°C.

Takto byla provedena celkem tři měření. Ve dvou případech byla do zorného pole kamer umístěna ještě nádoba s ledem pro porovnání barevné palety výsledných snímků. Jedno z měření s ledem bylo po analýze prohlášeno jako nevhodné z důvodu špatně vycentrované polohy plotýnky na jednom ze zařízení.

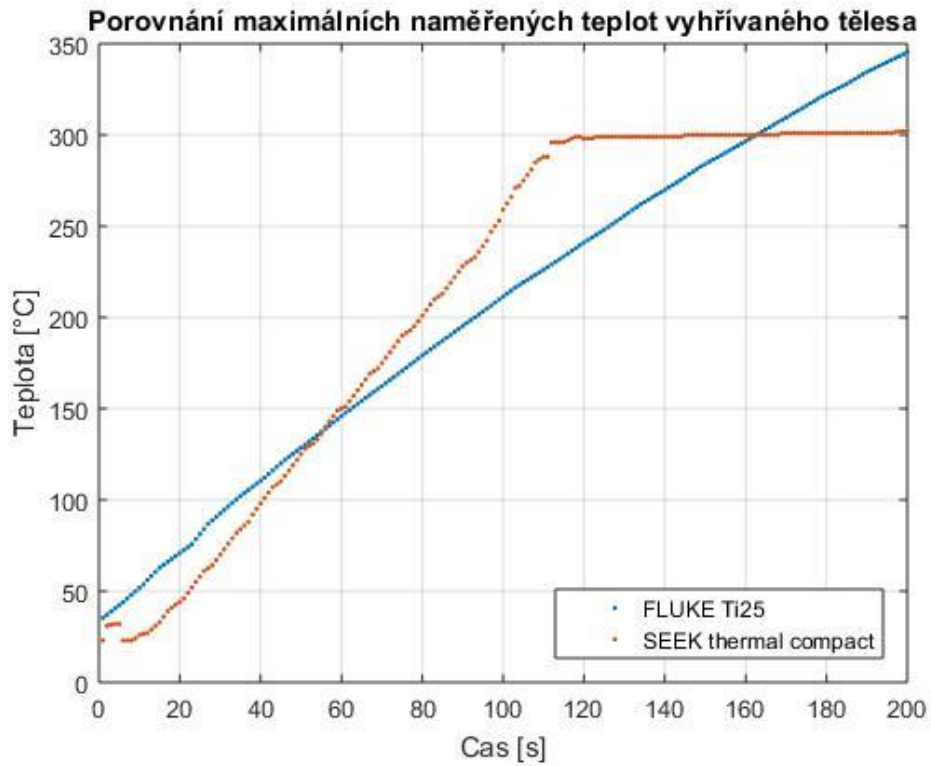
Následně byla data zpracována a vyhodnocena. Termokamera FLUKE ukládá data do formátu .IS2, což je formát, který je určený pouze pro daný model kamery a její příslušný ovládací software FLUKE CONNECT. Nejprve byla snaha data .IS2 zpracovat pomocí software Matlab. To se nepodařilo, jelikož není známá převodní charakteristika mikrobolometrů. Byl tedy použit software FLUKE CONNECT, který umožňuje export dat jednotlivých snímků do souborů formátu .xsl, kde každý soubor obsahuje teplotní data jednoho termosnímku.

Termální data pro termokameru SEEK jsou uložena do jednoho souboru formátu .csv, kde jeden řádek obsahuje data jednoho termálního snímku a unixové časové razítko. Data byla zapisována každou vteřinu.

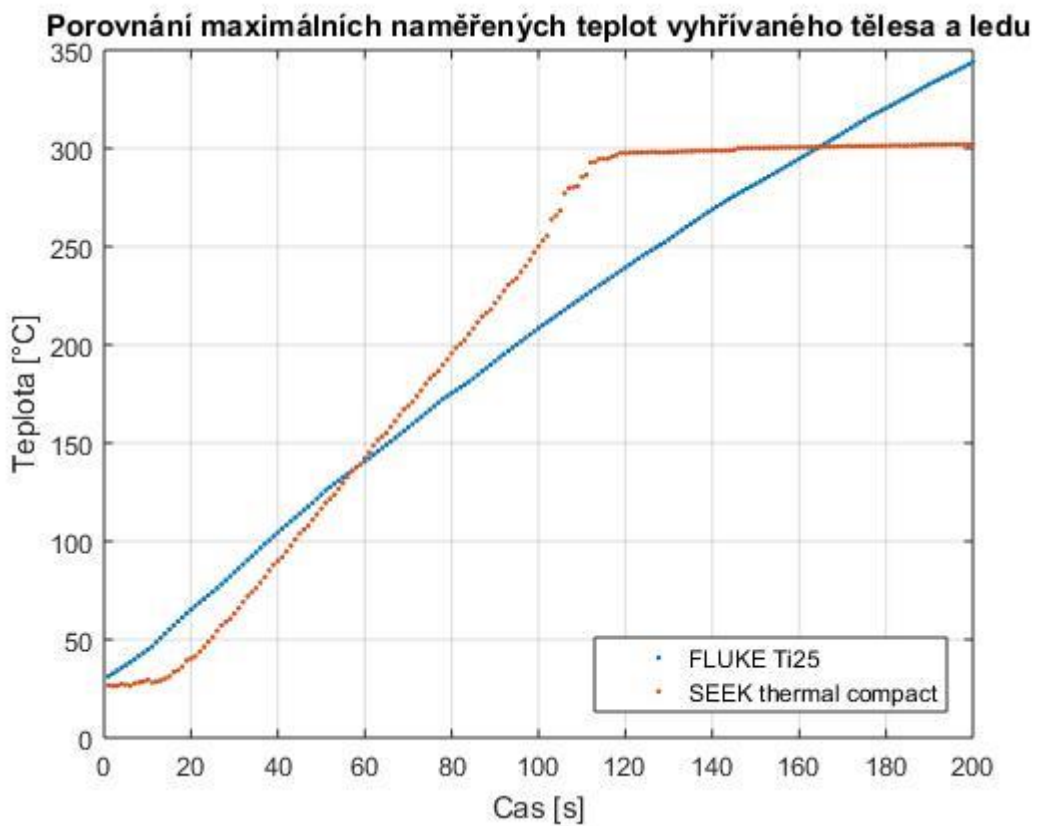
Následně byla data z obou kamer zpracována v Matlabu. Byla provedena časová synchronizace a lineární interpolace snímků tak, aby byla k dispozici série teplot pro každou vteřinu měření. Jelikož nebylo možné zaručit, aby obě kamery snímaly shodné pole, byla vždy určena pouze nejvyšší naměřená teplota, která byla vynesena do grafu. Výsledek je uveden na Obrázek 26 a Obrázek 27.

Za předpokladu, že data z termální kamery FLUKE jsou korektní, je zřejmá vysoká nepřesnost při vyhodnocení teplot termokamery SEEK. Navíc kamera není schopna měřit teploty vyšší než 300 °C, ač výrobce udává rozsah od -40 °C až 330 °C (viz Tabulka 3 *Porovnání parametrů termokamer*).

Pro účely použití kamery v aplikacích s 3D tiskárnou je zajímavé sledovat teploty v rozsahu od 50 °C až po 250 °C. V této části je možné obě křivky považovat za lineární. Tato data tedy lze za jistého zjednodušení nahradit přímkou. Následně je možné určit rovnici přímky a pomocí teplot naměřených kamerou FLUKE je možná korekce teplot naměřených termokamerou SEEK.



Obrázek 26 Měření č. 1



Obrázek 27 Měření č. 2

Je třeba ověřit, že vzájemná závislost mezi přímkami je lineární. K tomu lze použít *korelační koeficient* r . Lineární závislost dvou vektorů lze postihnout vynesáním proměnných do grafu. Lze si představit přímkou jako vyjádření lineárního vztahu a z odchylek bodů od přímky pak odhadnout míru tohoto vztahu. Pro korelační koeficient platí, že nabývá hodnot od -1 do +1, které značí perfektní lineární vztah.

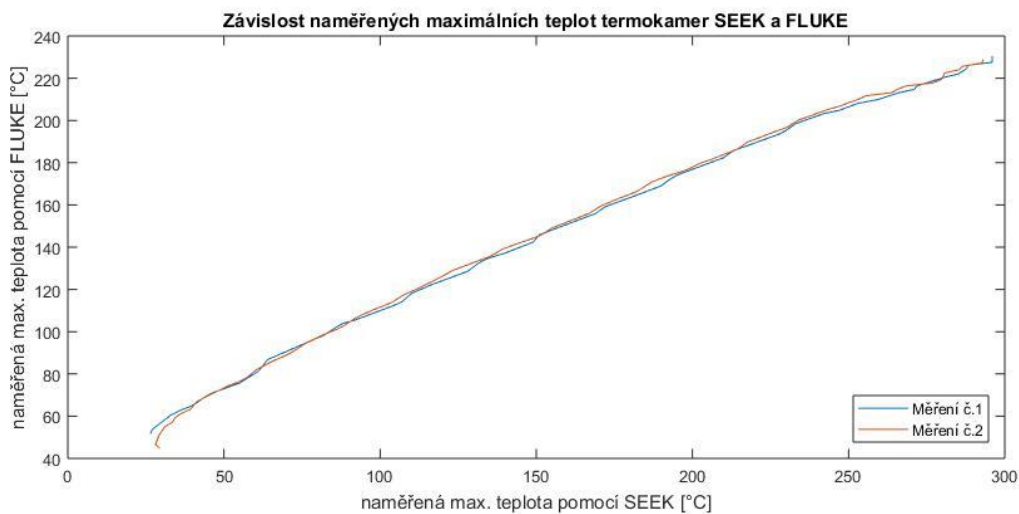
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad [60]$$

kde r je korelační koeficient (-),

s_{xy} je kovariance proměnných x a y ,

s_x, s_y jsou směrodatné odchylky proměnných x a y .

Z naměřených dat byla odhadnuta lineární oblast teplot naměřených kamerou FLUKE, tak aby vyhovovala teplotám od 50 °C do 220 °C a byly vypočteny korelační koeficienty r_1 a r_2 pro ověření linearitu.



Obrázek 28 Závislost naměřených maximálních teplot termokamer

Pro měření č.1 je korelační koeficient $r_1 = 0,9977$.

Pro měření č.2 je korelační koeficient $r_2 = 0,9961$.

Pokud se vezme v úvahu nepřesnost měření udávaná výrobcem FLUKE (viz Tabulka 5), je možné považovat oba případy za lineární. Pro následnou korekci teplot byla vybrána data z měření č.1.

Daný rozsah naměřených teplot byl nahrazen přímkami, které jsou definovány následujícími funkcemi:

$$T_{FLUKE} = 1,7134t + 42,605$$

$$T_{SEEK} = 2,6652t - 6,837$$

Pro čas t v zadaném intervalu vždy existuje změřená teplota T_{FLUKE} a T_{SEEK} . Lze tedy provádět korekci naměřené hodnoty kamerou SEEK pomocí přepočtu:

$$T_{SEEK_korekce} = \frac{T_{SEEK} + 6,837}{2,6652} \cdot 1,7134 + 42,605 \quad (^\circ\text{C})$$

Tato korekce byla implementována do ovládacího programu a aktivuje se vždy, pokud kamera naměří maximální hodnotu, která je vyšší než 50°C .

4.4 Možná vylepšení a budoucí vývoj

V případě samotné tiskárny by bylo zajímavé vyměnit závitové tyče M6 za trapézové tyče, které by díky vyššímu stoupání umožnily rychlejší pohyb ve směru osy Z. Upevnění těchto tyčí by mohlo zlepšit také celkovou stabilitu při pohybu ve směru osy Z.

V případě tiskových hlav další vývoj směřuje k automatizaci jejich výměny například pomocí robotické ruky, která by byla schopná v průběhu tisku automaticky měnit extrudéry. Bylo by poté možné vytvářet komplexní objekty, které by byly kombinací různých materiálů. Problém je kabelové spojení jednotlivých částí extrudérů s arduinem a RAMPS 1.4. Při implementaci do stávajícího zařízení je nutné počítat s některými limitacemi přístroje. RAMPS 1.4 umožňuje současné připojení pouze 2 extrudérů, je tedy třeba v budoucnu uvažovat o rozšíření.

Tisková hlava na kapalné materiály by mohla být vybavena topným tělesem a termoregulací, čímž by se rozšířilo portfolio možných materiálů například o čokoládu nebo například vosk.

U termální kamery by bylo vhodné se zaměřit na zkoumání funkce nevyužívaných snímků. Dále je možné implementovat další algoritmy, které budou sledovat konkrétní bod v prostoru. Dalším možným vylepšením je rozdělit sledované pole kamery na oblasti. Každá oblast by byla autonomní a na základě sledovaných parametrů pomocí termokamery by uživatel mohl definovat pro každou oblast jinou sekvenci instrukcí. Termální kamera by tak například mohla v jednom okamžiku hlídat teplotu krokových motorů, detekovat různé tiskové vady a kontrolovat celkovou nejvyšší teplotu. Je zapotřebí vzít v úvahu omezenou výpočetní rychlost mikroprocesoru Raspberry Pi 3B.

5 Závěr

Cíl této práce byl navrhnout a vytvořit 3D tiskárnu s více tiskovými hlavami a kontrolou tisku. Tento cíl byl splněn.

V práci byla navržena FDM 3D tiskárna s dvěma odnímatelnými tiskovými hlavami pro různé materiály. Tiskárna byla úspěšně sestavena a odzkoušena. Tiskárna je schopna tisknout z tradičních materiálů využívaných v 3D tisku, jako jsou PLA, ABS či PET-G v unifikované formě známé jako filament. Dále tiskárna dokáže tvořit objekty z materiálu s vlastnostmi silikonového tmelu či z plastických potravinářských materiálů. Konstrukce tiskárny je částečně vytvořena pomocí 3D tisku a je navržena tak, aby bylo možné tiskárnu snadno modifikovat, jelikož 3D tiskárny neustále procházejí intenzivním vývojem.

K tiskárně byl vytvořen kontrolní program, který využívá cenově dostupné termální kamery SEEK Thermal Compact. Tento program dokáže celoplošně hlídat překročení dané teploty a je schopen vyslat uživatelem definované instrukce G-code tiskárně při zadaných podmínkách. Kombinuje několik programovacích jazyků, řeší jejich vzájemnou kompatibilitu a lze jej využít formou pluginu do vzdáleného hostujícího software Octoprint pro ovládání 3D tiskárny nebo jako samostatný program pro použití v jiných aplikacích. V Octoprintu bylo k programu vytvořeno uživatelské prostředí, kde má uživatel možnost definovat, jaká teplota se bude sledovat a jaké instrukce se mají provést při překročení teploty. Dále plugin umožňuje online streaming termálního obrazu a vytvoření nahrávky s termálním videem s korespondujícími teplotními daty, která se současně ukládají do samostatného souboru. Plugin v reálném čase ukazuje maximální naměřenou teplotu.

Program je možné použít také pro další výzkum v oblasti 3D tisku, například pro optimalizaci algoritmů v programech určených k převodu STL modelu na vrstvy, či k vylepšování současných 3D tiskáren.

Měření teplot pomocí navrženého programu bylo ověřeno experimentálně za využití profesionální termální kamery FLUKE Ti25 a na základě výsledků měření byla navržena korekce, která zpřesňuje měřené hodnoty termokamery SEEK Thermal Compact.

Na práci je možné navázat zejména v těchto bodech:

- automatizace výměny tiskových hlav a jejich další vylepšení
- výzkum vlivu teploty na 3D tisk pomocí termální kamery
- rozšíření ovladače pro termální kameru

6 Citovaná literatura

- [1] 3dprintingindustry. [Online] [Citace: 9. 5 2019.] <https://3dprintingindustry.com/news/half-million-3d-printers-sold-2017-track-100m-sold-2030-131642/>.
- [2] Paškevič, D. *Bakalářská práce*. Praha : ČVUT FEL, 2013.
- [3] lascam. [Online] [Citace: 26. 3 2019.] www.lascam.cz/3d-tisk-prototyping/.
- [4] Makerslab. [Online] [Citace: 12. 4 2019.] <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>.
- [5] REPRAP. [Online] [Citace: 12. 4 2019.] <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
- [6] SCULPTEO. [Online] [Citace: 12. 4 2019.] <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>.
- [7] RevarBat. REPRAP. [Online] [Citace: 12. 4 2019.] <https://reprap.org/wiki/Snappy> .
- [8] all3dp. [Online] [Citace: 15. 4 2019.] <https://all3dp.com/2/3d-printer-frame-what-to-consider-and-which-to-buy/>.
- [9] ULTIMAKER. [Online] [Citace: 12. 4 2019.] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-s5>.
- [10] Průša, Josef. PRUSA3D. [Online] [Citace: 18. 4 2019.] www.prusa3d.cz.
- [11] REPRAP. [Online] [Citace: 3. 4 2019.] <https://reprap.org/forum/read.php?1,248920>.
- [12] thingiverse. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://www.thingiverse.com/groups/engineering/forums/general/topic:4384>.
- [13] Sanladerer, Thomas. toms3D. [Online] [Citace: 9. 3 2019.] <https://toms3d.org/2014/12/21/3d-printing-guides-everything-about-heated-beds/>.
- [14] bootsindustries. [Online] [Citace: 9. 3 2019.] <http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/>.
- [15] 3ders. [Online] [Citace: 2. 5 2019.] <https://www.3ders.org/articles/20141002-italian-studio-lab-unveils-open-source-syringe-extruder-for-fdm-3d-printers.html>.
- [16] *Control-Oriented Energy-Based Modeling of a Screw Extruder Used for 3D Printing*. Drotman, Dylan. 2016. 10.1115/DSCC2016-9651.
- [17] Ghazanfari, Amir, a další. *A NOVEL EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS FOR*. místo neznámé : Solid Freeform Fabrication 2016, 2016.
- [18] researchgate. [Online] [Citace: 2. 5 2019.] https://www.researchgate.net/figure/The-Bowden-configuration-on-the-left-vs-the-Direct-configuration-on-the-right_fig4_317974747.
- [19] MakeIt. [Online] [Citace: 2. 5 2019.] <http://makeit-3d.com/pro-1/#1468524279157-aac341ec-96ef>.
- [20] precisionmicrodrives. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://www.precisionmicrodrives.com/content/understanding-how-vibrations-are-transferred/>.
- [21] all3dp. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>.
- [22] fabbxible. [Online] [Citace: 2. 5 2019.] <https://www.fabbbxible.com/blogs/blog/multiple-extrusion>.
- [23] Průša, Josef. prusa3D. [Online] [Citace: 13. 4 2019.] <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-multi-material-2-0/>.
- [24] —. prusa3D. [Online] [Citace: 8. 5 2019.] <https://manual.prusa3d.com/Guide/MMU2+filament+jam/779?lang=en> .
- [25] filament-pm. [Online] [Citace: 8. 5 2019.] <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-pla-bila-1-kg/p61>.

- [26] materialpro3d. [Online] [Citace: 4. 5 2019.] <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>.
- [27] all3dp. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://all3dp.com/1/3d-printed-food-3d-printing-food/>.
- [28] all3dp. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://all3dp.com/2/chocolate-3d-printer-all-you-need-to-know/>.
- [29] cobod. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://cobod.com/>.
- [30] 3dpotter. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://3dpotter.com/>.
- [31] mymodernmet. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://mymodernmet.com/cerambot-ceramic-3d-printer/>.
- [32] Marlin. [Online] [Citace: 3. 5 2019.] <http://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>.
- [33] octoprint vs astroprint. *astroprint*. [Online] [Citace: 2. 4 2019.] https://blog.astroprint.com/octoprint_vs_astroprint/.
- [34] Kováčik, Miroslav. 3Dfactory. [Online] [Citace: 18. 4 2019.] <https://3dfactory.cz/2018/01/22/pristup-k-octoprintu-z-verejne-site/>.
- [35] *slic3r*. [Online] [Citace: 30. 3 2019.] <https://slic3r.org/>.
- [36] Marlin. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] <http://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>.
- [37] REPRAP. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] https://reprap.org/wiki/Shifted_layers.
- [38] simplify3d. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2015/09/Layer-Shifting.jpg>.
- [39] ultimaker. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] <https://ultimaker.com/en/resources/19537-how-to-fix-warping>.
- [40] Průša, Josef. prusa3d. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] <https://www.prusa3d.com/print-quality-troubleshooting/>.
- [41] gierad. [Online] [Citace: 28. 4 2019.] <http://www.gierad.com/projects/furbrication/>.
- [42] rigid. [Online] [Citace: 8. 5 2019.] <https://rigid.ink/blogs/news/3d-prints-warping-why-it-happens-and-how-to-prevent-it>.
- [43] *Vision based error detection for 3D printing processes*. Baumann, Felix a Roller, Dieter. místo neznámé : ICFST, 2016. 10.1051.
- [44] cad. [Online] [Citace: 7. 5 2019.] <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2851-3d-skenovani.html>.
- [45] photogrammetry. *GitHub*. [Online] [Citace: 7. 5 2019.] https://alicevision.github.io/#photogrammetry/natural_feature_extraction.
- [46] REPRAP. [Online] 23. 4 2019. https://reprap.org/wiki/Heated_Bed.
- [47] microcon. [Online] [Citace: 23. 4 2019.] https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/49554/Krokovy_motor_%28rady_SX17%29.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- [48] *automatizace*. [Online] [Citace: 7. 5 2019.] <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>.
- [49] Pešta, Jan, Tesař, David a Zwiener, Viktor. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. Praha : Dektrade, 2014. 9788087215159, 808721515X.
- [50] Williams, T. L. *An Introduction to Thermal Imaging. Thermal Imaging Cameras*. místo neznámé : CRC Press, FL, 2009. 9780429140822.
- [51] compact-series. *thermal.com*. [Online] [Citace: 12. 1 2019.] <https://www.thermal.com/compact-series.html>.
- [52] Thermal Imaging. *EEVblog*. [Online] [Citace: 15. 4 2019.] <http://www.eevblog.com/forum/thermal-imaging/yet-another-cheap-thermal-imager-incoming/>.

- [53] Molded Chalcogenide. *photonics*. [Online] [Citace: 30. 4 2019.]
https://www.photonics.com/Articles/Molded_Chalcogenide_Optics_Reduces_Cost_of/a24318
- [54] raytheon. *reportbuyer*. [Online] [Citace: 3. 5 2019.]
<https://www.reportbuyer.com/product/3673872/reverse-costing-of-raytheon-exc001-raytheon-ir-microbolometer.html>.
- [55] Harrison, Mike. YouTube. [Online] 28. 1 2015. [Citace: 20. 4 2019.]
<https://www.youtube.com/watch?v=jiPGTSTCREY>.
- [56] Häußge, Gina. Developing plugin. *Octoprint*. [Online] [Citace: 15. 3 2019.]
<http://docs.octoprint.org/en/master/plugins/index.html>.
- [57] *python*. [Online] [Citace: 15. 4 2019.] <https://docs.python.org/3/library/threading.html>.
- [58] FLASK. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <http://flask.pocoo.org/>.
- [59] OPENCV. [Online] [Citace: 1. 5 2019.] <https://opencv.org/>.
- [60] Matworks. *Matlab help*. [Online] [Citace: 15. 5 2019.]
<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html#bunkanr>.
- [61] Tepelné záření. *alma.karlov.mff.cuni*. [Online] [Citace: 22. 4 2019.]
<http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>.
- [62] Battalwar, Pooja, Gokhale, Janhvi a Bansod, Utkasrha. Infrared Thermography and IR Camera. *International Journal of Research In Science & Engineering*. 2015, 1.

7 Přílohy

Součástí práce jsou 3 přílohy. Příloha A (CD), Příloha B (instalace zásuvného modulu do Octoprint a jeho popis), Příloha C (Seznam použitých součástek ke stavbě 3D tiskárny a fotografie 3D tiskárny)

Příloha A

CD obsahuje zásuvný modul včetně vytvořených kódů pro ovládání termální kamery (Thermal Analyzer) v prostředí Octoprint. Dále jsou zde všechny kódy pomocných výpočtů a dat v Matlabu, které byly použity v kapitole 4.3.8. Jsou zde také soubory *STL*, vymodelovaných částí 3D tiskárny a tiskový profil pro použití extrudéru na kapalné materiály v programu Slic3r PE. Je zde také firmware Marlin s aktuálním nastavením pro tiskárnu.

Příloha B

Zásuvný modul (plugin) pro ovládání termální kamery v prostředí

Octoprint – pokyny pro instalaci

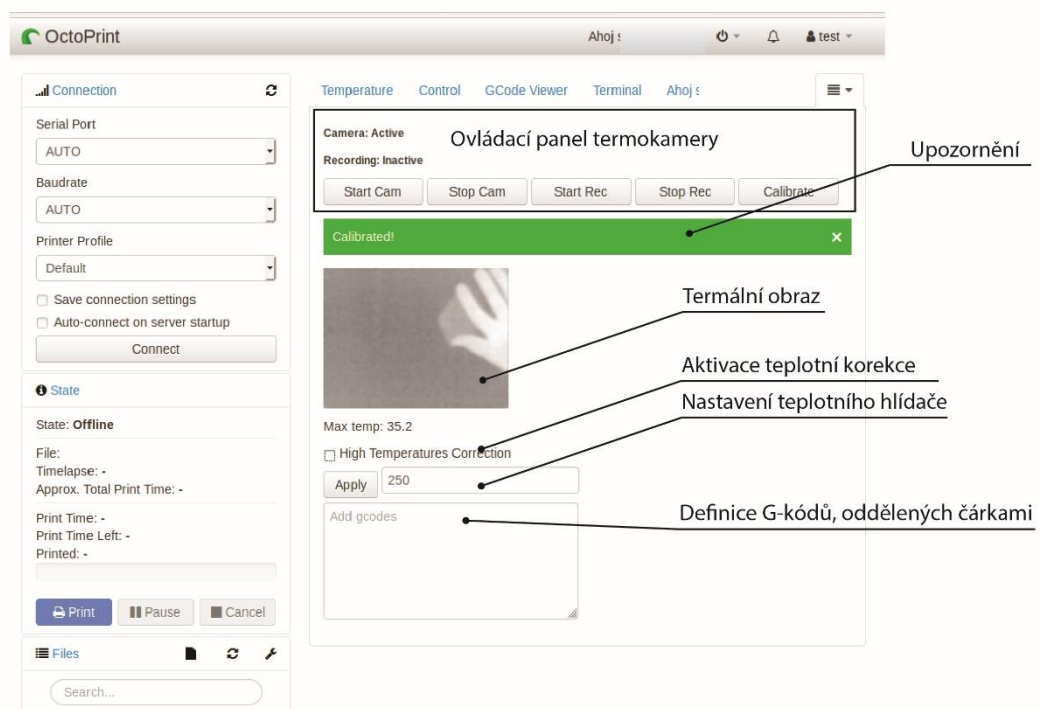
Minimální (testované) požadavky:

- Raspberry Pi 3B
 - OS OCTOPI 0.16.0
 - SD karta s minimální kapacitou 8 GB
- Python v. 2.7
 - PIP
 - Knihovny: Numpy, Scipy, OpenCV
- Termální kamera SEEK Thermal Compact
- Marlin v. 1.19

Instalace:

1. Stáhnout OS OCTOPI (dostupný volně z <https://octoprint.org/download/>)
2. Nainstalovat obraz na SD kartu (např. pomocí ETCHER)
3. V souboru *octopi-wpa-supPLICANT.txt* přidat SSID a PSK k dané síti.
4. Vložit SD kartu do Raspberry a připojit napájení.
5. Zjistit vytvořenou IP adresu a pomocí PC se k ní připojit
6. Postupovat přes průvodce nastavením Octoprint
 - a. zvolit uživatelské jméno a heslo (už. jméno: test, heslo: test)
7. Přes SSH se přihlásit k raspberry (např. pomocí PUTTY pro uživatele windows). Uživatelské jméno je defaultně nastaveno jako: *pi* a heslo je: *raspberrypi*
8. aktivovat virtual environment: *source oprint/bin/activate*
9. Instalace knihoven

- a. NUMPY: `pip install numpy`
 - b. SCIPY: `sudo apt install python-scipy`
 - c. OPENCV: `sudo apt install python-opencv`
 - d. popřípadě instalace dalších knihoven, které jsou uvedeny ve složce `/Thermo_Analyzer_master/camera/thermocam/thermocam_driver.py`
10. Přesunout složku s pluginem do Raspberry
 11. Kompilace zásuvného modulu pixelmath.A ve složce `/Thermal_Analyzer_master/camera/thermocam/` pomocí příkazů:
 - a. `python setupA.py build`
 - b. `sudo python setupA.py install`
 12. Ve složce `/Thermal_Analyzer_master/camera/static/js` upravit v souboru `camera.js` na řádcích 5 a 6 příslušný port (např. `:5000`) a na řádku 7 změnit identifikační klíč `ApiKey`, který je k dispozici ve webovém rozhraní Octoprint `settings -> API`
 13. Provést instalaci pluginu: `python setup.py install` ve složce `/Thermal_Analyzer_master`



Obrázek 29 Zásuvný modul Thermal Analyzer do Octoprint

Příloha C

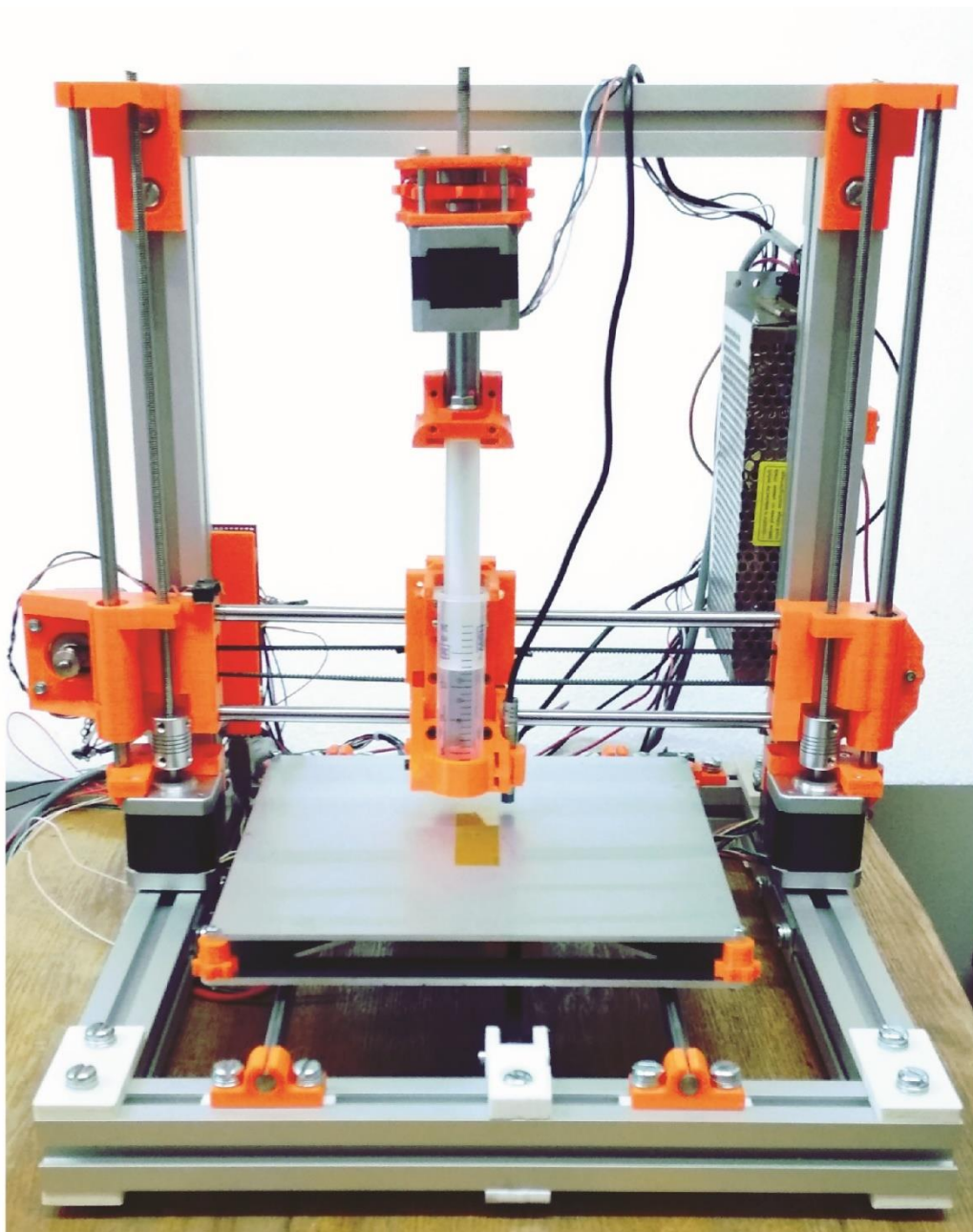
Seznam použitých součástek ke stavbě 3D tiskárny

Název	specifikace	počet ks
Arduino	MEGA 2560	1
Budič krokových motorů	DRV8825	5
FAN EXTENDER	pro RAMPS 1.4	1
Heatbed	(214x214) mm, 12V	1
Hliníková deska	(214 x 214 x 3) mm	1
Hliníkový profil "U" (10x5x1) mm	200 mm	1
Hliníkový profil kombi EN 573-3	320 mm	2
Hliníkový profil kombi EN 573-3	330 mm	2
Hliníkový profil kombi EN 573-3	340 mm	3
Hot End	12V, 40W	1
Hřídel	(5 x 10) mm	1
Hřídel	(3 x 9) mm	1
Indukční sonda	DC 5V NPN NC LJ8A3-2-Z/AX-5V	1
Kabel	síťový	1
Kabely	Propojovací	různé
Koncové spínače	KW11-3Z	2
Krokové motory	SX17-0905	6
Lineární ložiska	LM8UU	10
Ložiska	623 ZZ	12
Ložiska	625ZZ	4
Neodymové magnety	Válec (6 x 6) mm	12
Plastové díly	viz. Příloha A, složka STL	různé
Prodlužovací kabel	USB A	1
Průmyslový zdroj	12V/250W	1
Pružina pro extruder	20 mm	2
Průžná spojka pro motory	5 mm 6 mm	2
Přítlačné zařízení pro extrudér	Typ A	1
RAMPS	1.4	1
Raspberry Pi	3B	1
redukce	micro USB B/Female - USB A/Male	1
Řemen T2	2 m	1
Řemenice T2	T2	2
SD karta	8 GB	1
Spojovací materiál	různé	různé
Termální kamera	SEEK THERMAL COMPACT	1

Thermistor NTC	100 kOhm	2
Úhelníky	100 x 100 mm	2 nebo 4
Ventilátor	radiální	1
Ventilátor	40 mm	1
Vodící tyče W8	365 mm	2
Vodící tyče W8	305 mm	2
Vodící tyče W8	315 mm	1
Vodící tyče W8	293 mm	1
Závitová tyč M6	300 mm	2
Závitová tyč M6	160 mm	1

Tabulka 6 Seznam použitých součástek ke stavbě 3D tiskárny

Fotografie 3D tiskárny



Obrázek 30 Sestavená 3D tiskárna