

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra elektrotechniky a automatizace**



**Bakalářská práce**

**Úložiště na tiskové struny pro 3D tisk**

**Miroslav Nýdrle**

© 2023 ČZU v Praze

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Miroslav Nýdrle

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Úložiště na tiskové struny pro 3D tisk**

Název anglicky

**Filament storage for 3D printing**

---

## Cíle práce

Cílem práce je vytvoření komory pro ukládání tiskových strun pro 3D tisk. Práce bude obsahovat řešení vlastní komory a hardwarovou část elektroniky s měřením teploty a vlhkosti a s regulací veličin. Systém bude umožňovat komunikaci s PC nebo se zařízením s operačním systémem Android.

## Metodika

Prostudování hardwarových a softwarových možností řešení. Navržení několika variant provedení úlohy. Výběr nejvhodnější varianty s kritickým hodnocením návrhu. Realizace modelu a vytvoření obslužné aplikace na vybrané platformě. Specifikace funkcí modelu podle cílů práce.

## Doporučený rozsah práce

50stran, bez příloh

## Klíčová slova

3D tisk, tisková struna, snímače, regulace

---

## Doporučené zdroje informací

ALLEN, G. *Android 4 : průvodce programováním mobilních aplikací*. Brno: Computer Press, 2013. ISBN 978-80-251-3782-6.

BELL, C A. *Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi*. [New York, New York]: Apress, 2013. ISBN 1430258241.

KAINKA, B. *Měření, řízení a regulace pomocí PC : [vývoj hw a sw pro praxi]*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-089-.

KAINKA, B. *Využití rozhraní PC : měření, řízení a regulace pomocí standardních portů PC*. Ostrava: HEL, 1996. ISBN 80-902059-3-3.

VÁVRŮ, J. – UJBÁNYAI, M. *Programujeme pro Android*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4863-4.

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

## Vedoucí práce

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 7. 12. 2020

**doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 27. 02. 2023

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Úložiště na tiskové struny pro 3D tisk" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2023

Miroslav Nýdrle

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Miloslav Lindovi, Ph.D. za doporučení v návrhu řešení a konzultace. Nejvíce bych ale chtěl poděkovat své rodině a přátelům za zázemí a podporu, bez které bych tuto práci nebyl nikdy schopný dopsat.

# Úložiště na tiskové struny pro 3D tisk

## Abstrakt

Práce prezentuje rešerši, návrh a vlastní řešení systému pro ukládání filamentu pro 3D tisk. Systém zahrnuje komoru pro skladování filamentů a hardwarové a softwarové komponenty pro měření a řízení teploty a vlhkosti. Systém umožňuje komunikaci s počítačem nebo zařízením se systémem Android prostřednictvím asynchronního webového serveru. Komora pro skladování filamentů je zkonstruována z hliníkových profilů a hliníkových kompozitních panelů a obsahuje PTC ohřívač pro regulaci teploty. Systém používá senzor BME280 pro měření teploty a vlhkosti a silikagelový vysoušeč pro regulaci vlhkosti. Funkčnost systému byla hodnocena prostřednictvím řady testů, včetně testování regulace teploty a vlhkosti a funkčnosti webového serveru.

**Klíčová slova:** ESP32; vlhkost; teplota; filament; webserver; regulace; měření

# Filament storage for 3D printing

## Abstract

This thesis presents research, design, and implementation of filament storage system for 3D printing. The system includes a chamber for filament storage and hardware and software components for temperature and humidity measurement and control. The system allows communication with a computer or Android device via an asynchronous web server. The filament storage chamber is constructed of aluminum profiles and aluminum composite panels and includes a PTC heater for temperature control. The system uses a BME280 sensor for temperature and humidity measurement and a silica gel desiccant for humidity control. The functionality of the system was evaluated through a series of tests, including testing of temperature and humidity control and web server functionality.

**Keywords:** ESP32; humidity; temperature; filament; webserver; regulation; measurement

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Cíl práce a metodika .....</b>	<b>12</b>
2.1 Cíl práce .....	12
2.2 Metodika .....	12
<b>3 Přehled řešené problematiky .....</b>	<b>13</b>
3.1 Obecně o 3D tisku.....	13
3.1.1 FDM a FFF .....	13
3.2 Filamenty stručně .....	14
3.2.1 Výroba filamentů .....	14
3.2.2 Kvalita filamentu .....	16
3.2.3 Skladování filamentů .....	17
3.3 Existující způsoby skladování filamentů .....	17
3.3.1 Uzavíratelné sáčky .....	17
3.3.2 Vzduchotěsné nádoby .....	18
3.3.3 Levné komerční boxy .....	18
3.3.4 Industriální komerční boxy.....	19
<b>4 Vlastní řešení .....</b>	<b>20</b>
4.1 Podmínky uvnitř boxu.....	20
4.2 Konstrukce boxu .....	21
4.2.1 Rám boxu.....	21
4.2.2 Zakrytí boxu.....	22
4.2.3 Rozvrhnutí boxu .....	24
4.3 Ovládací elektronika .....	24
4.3.1 Výběr mikrokontroleru .....	25
4.3.2 Výběr vysoušedla.....	27
4.3.3 Výběr topného zařízení .....	28
4.3.4 Měřicí elektronika .....	29
4.3.5 Regulační elektronika .....	30
4.3.6 Napájení systému.....	31
4.4 Software .....	32
4.4.1 Měření a regulace.....	32
4.4.2 Webservice .....	33
4.4.3 Implementace kódu.....	35
<b>5 Výsledky a jejich zhodnocení .....</b>	<b>36</b>
<b>6 Závěr.....</b>	<b>38</b>



<b>7 Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>39</b>
<b>8 Přílohy .....</b>	<b>41</b>

## **Seznam obrázků**

Obrázek č. 1 Názorný příklad problémů s nekonzistentním průměrem filamentu .....	16
Obrázek č. 2 Podomácku vyrobený box .....	18
Obrázek č. 3 Komerční box RepBox .....	19
Obrázek č. 4 Názorná demonstrace principu blind joints .....	22
Obrázek č. 5 První návrh vlastního řešení boxu .....	24
Obrázek č. 6 ESP32 .....	25
Obrázek č. 7 MOSFET modul .....	30
Obrázek č. 8 Silentium PC zdroj .....	31
Obrázek č. 9 demonstrace PID algoritmu .....	33
Obrázek č. 10 Schéma zapojení .....	34
Obrázek č. 11 Zobrazení funkcionality boxu.....	37

## **Seznam tabulek**

Tabulka č. 1 srovnání technologií 3D tisku .....	14
Tabulka č. 2 Srovnání filamentů pro 3D tisk.....	14
Tabulka č. 3 porovnání materiálů pro zakrytí boxu.....	23
Tabulka č. 4 Porovnání mikroprocesorů.....	26
Tabulka č. 5 Porovnání vysoušedel .....	27
Tabulka č. 6 Porovnání způsobů vyhřívání .....	28
Tabulka č. 7 Porovnání senzorů vlhkosti a teploty .....	29
Tabulka č. 8 Náklady na materiály .....	37

## **Seznam použitých zkratek**

MCU – Microcontroller Unit

ESP – Espressif (výrobce)

I2C – Inter-Integrated Circuit, a communication protocol

PID –Proportional-Integral-Derivative control algorithm

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

HTML – Hypertext Markup Language

CSS – Cascading Style Sheets

API – Application Programming Interface

DC – Direct Current

AC – Alternating Current  
PWM – Pulse Width Modulation  
RV – relativní vlhkost  
PET – Polyethylene terephthalate  
PETG – Glycol-modified PET  
PTFE – Polytetrafluoroethylene  
UV – Ultraviolet  
CZK – Česká koruna  
FDM– Fused Deposition Modeling  
G-code – Geometric Code  
LCD – Liquid Crystal Display  
PLA – Polylactic Acid  
PTC – Positive Temperature Coefficient  
SLA – Stereolithography  
SLS – Selective Laser Sintering  
SLM – Selective Laser Melting  
STL – STereoLithography  
TPU – Thermoplastic Polyurethane

# 1 Úvod

Rostoucí rozšíření technologie 3D tisku v mnoha průmyslových odvětvích vede ke zvýšené poptávce po efektivních a spolehlivých řešeních pro skladování filamentu. Správné skladování filamentů má zásadní význam pro zajištění jejich dlouhé životnosti a vysoké kvality tisku. Cílem této práce je poskytnout návrhu a implementaci efektivního systému pro skladování filamentů.

Systém skladování filamentů navrhovaný v této práci je navržen jako box vyrobený z hliníkových profilů a hliníkových kompozitních panelů. K regulaci vnitřního prostředí v boxu se používá kombinace PTC ohřívače, senzoru BME280 a silikagelového vysoušedla. Tato kombinace zajišťuje, že filamenty jsou uschovávány v ideálních podmínkách. Systém je řízen mikrokontrolerem ESP32, který je zodpovědný za zpracování dat ze snímačů, regulaci topné jednotky a řízení komunikace s asynchronním webovým serverem. Webový server slouží jako páteř softwarové architektury a umožňuje aktualizace v reálném čase a vzdálený přístup k informacím a ovládacím prvkům systému.

Tato práce se zabývá základními aspekty systému pro skladování filamentů, od výběru materiálů a součástí až po integraci hardwaru a softwaru. Práce začíná analýzou stávajících komerčních řešení a průmyslových standardů, která je podkladem pro vývoj vlastního návrhu. Dále se zabývá konstrukcí boxu, výběrem vysoušedla a implementací řešení ohřevu. Následující části se zabývají výběrem mikrokontroleru, integrací senzorů, úvahami o napájení a vývojem softwarových komponent.

## **2 Cíl práce a metodika**

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh a realizace systému pro skladování filamentů pro 3D tisk, který umožní uživatelům snadné a efektivní uskladnění a organizaci svých materiálů. Systém bude zahrnovat hardware i software část, která se bude starat o monitorování a kontrolu teploty a vlhkosti v komoře dle parametrů určené uživatelem. Po určení základních parametrů se práce bude zabývat výběrem a porovnáním materiálu pro vytvoření komory a elektroniky pro hardware i software část.

### **2.1 Cíl práce**

- Návrh a realizace systému pro skladování filamentů pro 3D tisk.
- Snadné a efektivní uskladnění a organizaci materiálu
- Jednoduchá a cenově výhodná konstrukce

### **2.2 Metodika**

- Seznámení s principem výroby filamentu a jeho skladování.
- Porovnání dostupných produktů na trhu
- Princip zvolení materiálů a elektronických součástek a modulů pro box
- Podrobný popis konstrukce komory.
- Objasnění principu fungování celého systému a softwaru pro regulaci prostředí v komoře.

### 3 Přehled řešené problematiky

Pro pochopení problematiky správného ukládání filamentů je potřeba vysvětlit princip samotného tisku. V této sekci si povíme něco o základním principu technologie 3D tisku, výroby filamentů a parametrech ovlivňující kvalitu tisku.

#### 3.1 Obecně o 3D tisku

Aditivní proces výroby, známý jako 3D tisk, umožňuje vytváření třírozměrných objektů z digitálních 3D modelů. Proces začíná importováním digitálního 3D modelu (např. STL souboru) do specializovaného softwaru nazývaného slicer. Tento software rozdělí model na stovky nebo tisíce tenkých vrstev a následně vygeneruje soubor G-kódu. Soubor G-kódu obsahuje seznam pokynů pro 3D tiskárnu

Jazyk G-kód řídí pohyby tiskárny při 3D tisku a specifikuje velkou škálu příkazů, které ovlivňují teplotu tisku materiálu, ofuk výtisku a určují, kdy a kde se materiál má položit, aby vytvořil objekt. Soubor G-kódu zahrnuje mnoho podrobností, jako například výšku vrstvy, teplotu trysky, rychlost tisku a dráhu, po které bude extruder vytvářet jednotlivé vrstvy.

Existuje několik technologií 3D tisku, jako například Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) a Selective Laser Melting (SLM). Každá technologie používají materiály a postupy specifické pro svůj styl výroby, základní princip však zůstává stejný – výsledný fyzický objekt se tiskne vrstvu po vrstvě až do dokončení[1].

##### 3.1.1 FDM a FFF

Fused Deposition Modeling (FDM) a Fused Filament Fabrication (FFF) jsou dva termíny, které popisují podobný proces 3D tisku. FDM je označení, které používá společnost Stratasys pro patentovanou technologii, která zahrnuje ohřev termoplastického materiálu a extruzi materiálu v určitém tvaru, následovanou pokládáním vrstvy po vrstvě, aby se vytvořil konečný objekt. Na druhé straně, FFF je termín používaný výrobci 3D tiskáren, kteří nevlastní patent na FDM, a popisuje podobný proces jako FDM.

FDM a FFF jsou technologie 3D tisku, které se často používají pro vytváření prototypů, modelů a funkčních dílů. V hobby sféře jsou tyto technologie velmi populární. V průmyslu jsou však preferovány jiné technologie, jako například SLS nebo SLA, které umožňují vytváření objektů z kovů a dalších zajímavých industriálních materiálů[1].

Tabulka č. 1 Srovnání technologií 3D tisku

Druh	Princip	Materiály	Cena průmyslové tiskárny [CZK]	Hobby alternativy [CZK]
FDM FFF	Extrudování termoplastu pomocí ohřáté trysky	Termoplasty PLA ABS, Nylon	100 000 – 500 000	5 000 – 50 000
SLA DLP LCD	Ztuhnutí kapalné fotopolymerní pryskyřice pomocí UV laseru, projektoru nebo obrazovky	Fotopolymerní pryskyřice (Resin)	50 000 – 1 000 000	5 000 – 50 000
SLS	Spékání prášku laserem	Nylon, TPU, PEEK	250 000 – 1 000 000	N/A
SLM	Tavení kovového prášku pomocí laseru	Kovy (např. titan, nerezová ocel)	2 000 000 – 50 000 000	N/A

Zdroj: Vlastní zpracování

## 3.2 Filamenty stručně

Filament je termoplastový materiál, který se používá jako surovina pro 3D tisk. Existuje v různých barvách a materiálech, jako jsou ABS, PLA, PETG a nylon. Filament se vyrábí extruzí, což zahrnuje roztavení plastových granulí a jejich tlačení skrze malé trysky tak, aby se vytvořilo dlouhé, tenké vlákno materiálu s určitým průměrem. Vlákno je poté navinuto na cívku, zabaleno do vakuovaného sáčku, zabaleno pro přepravu a prodává se zákazníkům[1]–[4].

Tabulka č. 2 Srovnání filamentů pro 3D tisk

Typ materiálu	PLA	ABS	PETG	TPU	PA(Nylon)	PEEK
Mez kluzu [MPa]	40–60	40–50	50–70	10–25	60–80	90–110
Modul pružnosti [GPa]	2–4	2–3	2–3	0,1–1,5	2–6	4–8
Teplota skelného přechodu [°C]	45–60	80–100	60–90	50–60	90–160	160–300
Doporučená tisková teplota [°C]	180–230	220–250	220–260	200–260	240–280	360–450
Citlivost na vlhkost	Nízká	Nízká	Vysoká	Vysoká	Velmi vysoká	Střední
Náročnost na tisk	Nízká	Střední	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká

Zdroj: Vlastní zpracování

### 3.2.1 Výroba filamentů

Výroba filamentů je proces výroby termoplastických materiálů, které se převážně používají jako výchozí materiál pro technologie 3D tisku. Výrobní proces obvykle zahrnuje vytlačování surových plastových granulí z materiálů, jako jsou například PLA, ABS, PETG, přes přesně řízený extruzní systém, který materiál tvaruje a ochlazuje do souvislého

vlákna o stejném průměru. Výroba vysoce kvalitních vláken vyžaduje přísnou kontrolu parametrů, jako je teplota, rychlost vytlačování a rychlost chlazení tak, aby byl zajištěn konzistentní průměr, pevnost a souosost vlákna[1]–[4].

- Příprava surového materiálu

Prvním krokem výroby filamentu je příprava surového materiálu, který obvykle přichází ve formě malých plastových granulí. Tyto granule vyrábí výrobci plastů a obvykle se prodávají ve velkých pytlích nebo nádobách. Granule jsou zkontrolovány a tříděny, aby se zajistilo, zda splňují požadované specifikace pro výrobu filamentu. Granule mohou být také smíchány s barvivy nebo jinými přísadami, aby se vytvořily specifické typy filamentu.

Sušením granulí před výrobou filamentu se odstraní veškerá vlhkost přítomná v granulích, což pomáhá zajistit konzistentní průměr filamentu při výrobě, rovnoměrnou extruzi při tisku a pevný, odolný filament[1]–[4].

- Roztavení plastu

Jakmile je surový materiál připraven, je vložen do extruderu, což je stroj, který ohřívá a roztavuje plast. Extruder se skládá z válce s uvnitř umístěným šroubem, který rotuje a tlačí plastové granule směrem k ohřivači na konci válce. Ohřivač roztaví plastové granule a šroub dále protlačuje taveninu plastu směrem k trysce na konci válce[1]–[4].

- Extruze filamentu

Když se tavenina plastu protlačuje směrem k trysce, prochází malým otvorem, který ji tvaruje do dlouhého tenkého vlákna. Tento proces se nazývá extruze. Velikost otvoru trysky může být upravena pro kontrolu průměru filamentu. Extrudovaný filament se chladí při opuštění trysky a poté ho táhnou válečky, aby se zajistilo, že zachová svůj tvar a průměr[1]–[4].

- Chlazení a nastavení velikosti filamentu

Extrudovaný filament je poté veden skrze chladicí komoru, která může používá větráky nebo vodu pro chlazení filamentu. Chladicí proces je důležitý, aby se zajistilo, že filament bude mít správnou průměrovou toleranci a nebudou se vyskytovat žádné nežádoucí deformace. Filament musí být také řádně navinut na cívku, aby se minimalizovalo jeho poničení během přepravy[1]–[4].

- Balení a distribuce

Jakmile je filament ochlazen a navinut na cívku, je zabalen a připraven k distribuci. Filament se obvykle balí do ochranných vakuovaných sáčků, aby se minimalizoval vystavení

vlhkosti, prachu a jiných kontaminantů. Poté je cívka vložena do krabice a označena typem filamentu, barvou a dalšími informacemi[1]–[4].

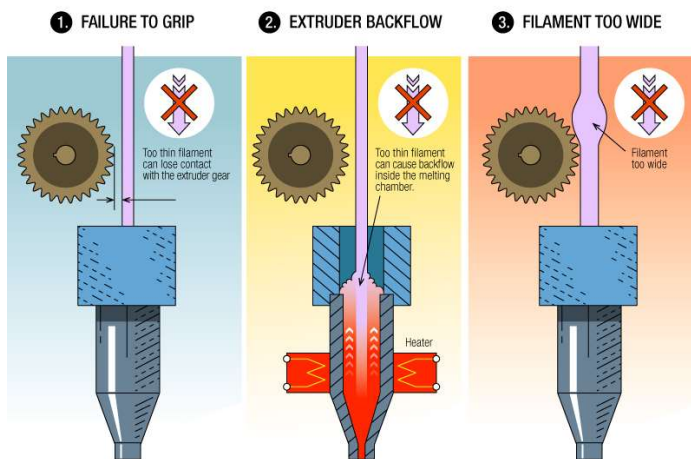
### 3.2.2 Kvalita filamentu

Kvalita filamentu je důležitým faktorem, který ovlivňuje kvalitu a spolehlivost 3D tisku. Vysoce kvalitní filamenty vykazují konzistentní průměr, minimální odchylky v sousostí, a to rovnoměrně po celé cívce. Tyto vlastnosti přispívají k optimální extruzi, snížení šance na ucpávání trysky a lepší přilnavosti vrstev během tisku. Vysoce kvalitní filamenty navíc vykazují minimální absorpci vlhkosti a jsou kvalitně zabaleny a chráněny proti vnějším vlivům, což zachovává jejich kvalitu[1]–[4].

- Konzistence průměru

Průměr filamentu by měl být konzistentní po celé délce návinu cívky. Výkyvy od stanoveného průměru můžou mít za následek nedostatek, nebo přebytek materiálu při tisku, což by způsobilo vzhledové ale především fyzické vady ve výsledném tisku. Pro 1,75mm filament bývá standart  $\pm 0.05\text{mm}$  odchylka od jmenovitého průměru, některé firmy ale produkují kvalitnější filamenty, například Prusament má odchylky  $\pm 0.02\text{mm}$  a  $\pm 0.03\text{mm}$  pro své materiály[1]–[4].

Obrázek č. 1 Názorný příklad problémů s nekonzistentním průměrem filamentu



Zdroj: [5]

- Souosost

Filament by měl být dokonale kulatý, aby byl zajištěn hladký průchod extruderem a bowden trubičkou. Pokud filament není souosý, je možné, že dojde k blokaci, či zaseknutí filamentu[1]–[4].



- Obsah vlhkosti

Vlhkost filamentu může ovlivnit jak vzhled, tak fyzické vlastnosti výsledného tisku. Při ohřátí filamentu může dojít k expanzi absorbované vody, což způsobí bublání materiálu při extruzi. Kvůli tomuto bublání nedochází k ideálnímu přilnutí mezi vrstvami, což zhoršuje fyzické vlastnosti finálního výtisku[1]–[4], [6], [7].

- Návin na cívce

Nesprávná manipulace s filamentem během výroby může zapříčinit nedokonalý návin na cívce, čímž se část filamentu může uvolnit a zamotat.

- Kvalita materiálu

Kvalita základního materiálu použitého k výrobě filamentu může výrazně ovlivnit kvalitu vytištěného objektu. Méně kvalitní materiály mohou obsahovat nečistoty, které mohou způsobit vady nebo ucpání[1]–[4].

### 3.2.3 Skladování filamentů

Ne všechny filamenty se dají jednoduše skladovat. Většina výrobců má na boxu s filamentem napsané ideální podmínky pro dlouhodobé skladování filamentů, jako jsou například skladování v suché místnosti, bez slunečního/UV záření.

Vlhkost je jeden z hlavních faktorů ovlivňující kvalitu filamentu při skladování. Většina filamentů, obzvláště hygroscopické, jako jsou například PET, PETG a Nylon dokážou absorbovat vlhkost ze vzduchu řádově v hodinách. Takže je možné, že filament během přípravy pro tisk absorbuje tolik vlhkosti, aby to negativně ovlivnilo kvalitu výtisku. Filamenty by se také neměly vystavovat přímému slunečnímu záření a zdrojům tepla, které by mohly způsobit permanentní poškození filamentu, nebo zhoršení tiskových vlastností[6], [7].

## 3.3 Existující způsoby skladování filamentů

Analýzou existujících systémů pro skladování filamentů můžeme vyčlenit základní parametry, které jsou potřeba pro návrh kvalitního systému potřeba.

### 3.3.1 Uzavíratelné sáčky

Uzavíratelné sáčky jsou běžnou a cenově výhodnou možností pro skladování filamentů. Uživatelé je tak mohou použít pro základní skladování filamentů, společně s pytlíky silikagelů pro pohlcení vlhkosti. Je důležité, aby byly sáčky vyrobeny z kvalitního

materiálu, který dokáže udržet vakuum po delší době a nepropouští vlhkost. Proto mají některé sáčky sendvičovou vrstvu alobalu mezi vnějšími vrstvami plastu.

Hlavní výhodou je cena. Mnoho filamentů je z výroby zabaleno v obdobných vakuovaných, zipových sáčcích, s pytlíky silikagelů, což dělá tuto verzi zdarma.

Hlavní nevýhodou je nemožnost používání filamentu pro tisk během skladování[8].

### 3.3.2 Vzduchotěsné nádoby

Podomácku vyrobené boxy pro skladování filamentů. Často využívající plastové průhledné krabice. Na internetu je k dispozici velké množství různorodých designů pro skladování jednoho, či vícero filamentů. Mezi vyzdvihované vlastnosti těchto boxů patří vzduchotěsnost, které se dosáhne použitím těsnění podél víka boxu. Možnost měření a kontroly vlhkosti a teploty uvnitř boxu, pomocí jednoduchých čidel s integrovanými zobrazovacími jednotkami. Dostatek místa pro vysoušedla pro snížení relativní vlhkosti uvnitř boxu, například silikagel, nebo chlorid vápenatý. Důležitá je také možnost používat filament pro tisk přímo z boxu. S použitím spojek a PTFE trubiček je možné zavést filament z boxu přímo k tiskárně[8].

Obrázek č. 2 Podomácku vyrobený box



Zdroj:[8]

### 3.3.3 Levné komerční boxy

Existuje spousta uživatelů, kteří si chtějí koupit již existující řešení. Komerční boxy se teoreticky moc neliší od podomácku vyrobených alternativ. Jsou nicméně vyrobeny z dražších, kvalitnějších materiálů a chytře integrovanými funkcemi. Zde se také můžeme setkat s aktivním vysoušením filamentu pomocí topných těles a ventilace pro odvod vlhkosti.

V těchto boxech se také často používají pytlíčky se silikagelem pro absorpci vlhkosti při skladování.

Hlavní nevýhodou je kapacita. Boxy jsou často navrhovány pouze pro jednu, či dvě cívky filamentu. O eliminaci této nevýhody se snažila společnost RepKord, která má vícero systémů pro ukládání filamentů, nicméně pro tuto sekci je důležitý systém se jménem RepBox. Jedná se o sestavený systém, nebo stavebnici úložného systému z plexiskel, vytištěných dílů a spojovacích materiálů. Prémiová verze také obsahuje těsnění, lepší systém pro uzavírání boxu, balíčky silikagelu a čidlo pro měření teploty a vlhkosti s vlastní zobrazovací jednotkou. Základní verze postrádá funkčnost podomácku vyrobených skladovacích boxů a prémiová verze nenabízí aktivní vysoušení filamentů. Oproti předchozím možnostem se jedná o dražší systém, nicméně na trhu si našel své místo a zůstává atraktivní možností pro jednotlivce, či menší podnikatele[9].

Obrázek č. 3 Komerční box RepBox



Zdroj:[9]

### 3.3.4 Industriální komerční boxy

Industriální systémy skladování filamentu jsou zpravidla větší a výkonnější, než hobby systémy pro skladování a jsou určeny pro zpracování velkých objemů filamentu v průmyslovém nebo komerčním prostředí. Průmyslové sušičky filamentů používají k odstranění vlhkosti z filamentů kombinaci tepla a proudění vzduchu. Některé modely mají také možnost vakuově utěsnit sušicí komoru, aby se dále snížila úroveň vlhkosti. Teplotní rozsah průmyslových boxů je obvykle vyšší, až do 200 °C

Některé průmyslové boxy jsou vybaveny pokročilými funkcemi, jako je automatické sledování a kontrola vlhkosti, programovatelné sušicí cykly a sledování průběhu sušení filamentů v reálném čase[10].

## 4 Vlastní řešení

Pro navržení vlastního řešení bylo nezbytné provést analýzu stávajících designů na trhu. Díky této analýze budeme schopni identifikovat klíčové prvky, osvědčené postupy a nedostatky současných řešení, což nám umožní vyvinout základ navrhovaného systému skladování filamentů. Mezi klíčové aspekty, které byly během porovnání zvažovány patřily

- Funkčnost

Hlavním účelem systému pro skladování filamentů je chránit filamenty před vlhkostí, prachem a dalšími nečistotami a zároveň umožnit snadný přístup k materiálu. Konstrukce proto musí tyto aspekty zohledňovat a upřednostňovat, aby byla zajištěna dlouhá životnost filamentu.

- Jednoduchost

Uživatelsky přívětivý design, který se snadno sestavuje, udržuje a obsluhuje, je důležitý pro zaujetí široké škály uživatelů. Konstrukce by měla vyhovovat uživatelům s různou úrovní odborných znalostí a umožňovat flexibilitu při stavbě na míru.

- Cena

Pro zpřístupnění systému pro skladování filamentů širokému okruhu uživatelů je důležité dosáhnout správné rovnováhy mezi cenou a výkonem. Konstrukce by měla být nákladově efektivní při zachování dostačujících standardů kvality a funkčnosti. ()

### 4.1 Podmínky uvnitř boxu

Ideální podmínky uvnitř boxu na filamenty závisí na typu skladovaného filamentu, protože různé filamenty mají různou míru absorpce vlhkosti a optimální podmínky skladování.

- Teplota

Teplota v boxu by se měla pohybovat mezi 25-60 °C. Tento rozsah teplot pomáhá zabránit kondenzaci vlhkosti ve filamentech v závislosti na uloženém materiálu. Je důležité

podotknout, že filamenty jako PLA a PETG mají nižší teplotu skelného přechodu a neměly by se uschovávat ve vyšších teplotách určených pro nylon, či polykarbonát.

- Vlhkost

Vlhkost uvnitř suchého boxu by měla být nižší než 30 %. Čím nižší je vlhkost, tím lepší podmínky pro skladování filamentů. Vysoká vlhkost uvnitř boxu může způsobit, že filament bude tuto přebytečnou vlhkost ve vzduchu absorbovat, což může vést ke znatelné degradaci kvality tisku.

- Vzduchotěsné utěsnění:

Box by měl být vzduchotěsně uzavřen, aby se zabránilo vniknutí vlhkosti. To pomůže udržet kontrolované prostředí pro filamenty.

- Vysoušení filamentů:

Pokud jsou filamenty před uložením do boxu vystaveny vysoké vlhkosti, lze ke snížení vlhkosti uvnitř filamentů použít sušičku filamentů. Nicméně návrh tohoto boxu obsahuje topné těleso, které se postará o patřičné vysoušení filamentů dle nastavení uživatele.

- Vysoušedlo:

Do sušicího boxu lze umístit vysoušedlo, například silikagel, chlorid vápenatý, nebo aktivní uhlí, které pomáhá absorbovat případnou vlhkost, která se do boxu mohla dostat opětovným otevíráním, nebo při aktivním vysoušení filamentu.

## 4.2 Konstrukce boxu

V rámci řešení této bakalářské práce byla provedena podrobná analýza komerčních řešení, na základě které, byl vytvořen základní koncept boxu pro skladování filamentů. Tento koncept slouží jako základ pro další rozvoj a optimalizaci systému skladování.

### 4.2.1 Rám boxu

Hlavním důvodem pro zvolení hliníkových profilů s T-drážkami jako materiálu pro konstrukci rámu úložného boxu je jedinečná kombinace jejich výhod. Tyto profily nabízejí modulární systém, který umožňuje navrhovat řešení na míru, splňující specifické požadavky na rozměry, skladovací kapacitu a cenovou dostupnost.

Hliníkové profily jsou pevné a odolné vůči korozi, což zaručuje, že výsledný úložný box bude odolný vůči vnějším podmínkám a konstrukčně stabilní. Navíc profily s T-

drážkami umožňují snadnou montáž a demontáž, což usnadňuje úpravy, rozšíření či údržbu konstrukce úložného boxu dle potřeby.

Slepé spoje, známé jako „blind joints“ v angličtině, jsou způsob konstrukce, který skrývá spojovací prvky uvnitř drážek profilů. Tímto způsobem se výsledný rám snadno sestavuje a poskytuje dodatečnou pevnost konstrukce bez viditelných spojovacích prvků, což přispívá k estetice celého boxu.

Kompatibilita hliníkových profilů s různými příslušenstvími, jako jsou držáky, panty, úchyty a spojovací prvky, přispívá ke zlepšení funkčnosti a estetiky úložného boxu pro filamenty.

Obrázek č. 4 Názorná demonstrace principu blind joints

How to Connect Tapping Joints (Tapped holes are not required for extrusion connection.)			
Step	1	2	3
Description	Tighten temporarily the tapping joint on extrusion end face. (Refer to appropriate tightening torque above.)	Pass the head of tapping joint through the slot of Extrusion (B), and slide it down to the bottom of (A). T.J plate goes through the slot of extrusion (B) too.	Pass the Torx Bit through wrench hole, and tighten it by a motorized screw driver.
Tapping Joints	<p>*Tapped holes are not required.</p>	<p>*Part below neck of HTJ8 is thinned so as to be engaged with slot width of 10mm (HFS8 Series).</p>	

Zdroj: [11]

#### 4.2.2 Zakrytí boxu

V kontextu této bakalářské práce volba mezi hliníkovými kompozitními deskami (ACP) a plexisklem závisí na faktorech jako je rozpočet, odolnost, izolační vlastnosti a možnosti přizpůsobení. V konečném důsledku by rozhodnutí mělo vycházet z konkrétních potřeb a požadavků projektu, i z případných příslušných bezpečnostních předpisů nebo směrnic. V této práci byly zvoleny APC desky z těchto důvodů

- Odolnost:

ACP jsou známé svou vysokou odolností a pevností, takže jsou ideální pro ochranu obsahu úložného boxu před vnějšími vlivy, jako je vlhkost, prach a nárazy. Narozdíl od plexiskla, nebo polykarbonátových desek nejsou tak křehké

- Hmotnost:

ACP jsou lehké, což znamená, že se snadno přepravují a manipuluje se s nimi. To může být obzvláště užitečné, pokud je třeba úložný box často přemísťovat.

- Izolační vlastnosti:

ACP mají dobré tepelně izolační vlastnosti, což znamená, že teplo nebude unikat z boxu a udrží se uvnitř konstantní teplota. To je důležité zejména pro skladování filamentů, protože některé typy filamentů vyžadují specifické teplotní podmínky, aby nedošlo k jejich degradaci.

- Estetický vzhled:

ACP jsou k dispozici v různých barvách a povrchových úpravách, což znamená, že je lze přizpůsobit tak, aby odpovídaly estetickému vzhledu určené uživatelem.

- Přizpůsobivost:

ACP lze snadno řezat a tvarovat podle konkrétních požadavků na konstrukci, což znamená, že box s filymenty lze přizpůsobit konkrétním potřebám uživatele.

- Bezpečnost:

ACP je nehořlavý materiál, který může poskytnout další vrstvu bezpečnosti v případě jakýchkoli nepředvídaných nehod.

Tabulka č. 3 porovnání materiálů pro zakrytí boxu

Materiál	ACP	Polykarbonát	Plexisklo
Pevnost [MPa]	70-300	60-90	70-120
Tepelná vodivost [W/mK]	0.1-0.15	0.2-0.3	0.15-0.2
Snadnost zpracování	Snadno seříznutelné, vrtatelné a ohybatelné	Snadno seříznutelné, vrtatelné a ohybatelné za tepla	Náročnější pro seříznutí, vrtání, ohybatelné za tepla
Odolnost vůči vlhkosti	Vysoká odolnost vůči vlhkosti	Dobrá odolnost vůči vlhkosti	Náchylné na absorpci vlhkosti
Tepelná rozažnost [ $\mu\text{m}/\text{mK}$ ]	12-24	65-70	70-80
Chemická odolnost	Vysoká odolnost vůči většině chemikálií	Dobrá odolnost vůči mnoha chemikáliím	Střední odolnost vůči chemikáliím, náchylné k rozpouštění
Cena za $\text{m}^2$ o tloušťce 3mm [Kč]	520	1000	1000

Zdroj: Vlastní zpracování dat ze zdrojů: [12]–[15]

### 4.2.3 Rozvrhnutí boxu

Samotné rozložení je velice důležité pro správnou funkci boxu. Při navrhování systému pro skladování filamentu je důležité, aby byl systém co nejvíce efektivní.

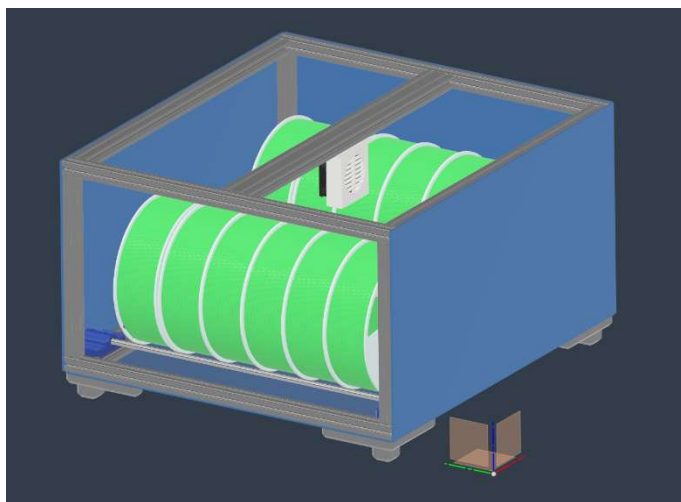
- Jednoduchá výměna filamentů

Skladovací systém by měl mít dobře navržený držák cívek, který by umožňoval snadné vkládání a vyjímání cívek. Držák by měl být navržen tak, pojal řadu velikostí a typů cívek, protože výrobci využívají různé druhy cívek, nehledě na cívky s jinou jmenovitou hmotností.

- Tisknutí z boxu

Skladovací systém by měl umožňovat přímé podávání filamentu přes box do 3D tiskárny. Toho lze dosáhnout tak, že se v stěnách boxu navrhne otvor, skrz který bude umožněn průchod filamentu až do tiskárny, aniž by bylo nutné cívku z boxu vyjmout. Tento otvor ale musí být uzavíratelný, aby nedošlo ke změně podmínek v boxu

*Obrázek č. 5 První návrh vlastního řešení boxu*



*Zdroj: Vlastní zpracování*

### 4.3 Ovládací elektronika

V této části práce se zaměříme na vývoj a implementaci řídicí elektroniky a jejího softwaru. Efektivní řídicí systém je klíčový pro zajištění optimální interakce uživatele s boxem a celkové funkčnosti systému skladování. Řídicí elektronika bude zodpovědná za monitorování a regulaci teploty a vlhkost. Také bude sloužit zprostředkování interakce uživatele se systémem prostřednictvím webového rozhraní.

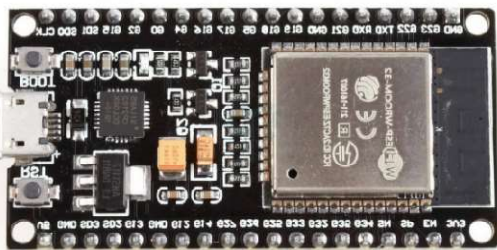


Cílem je navrhnout funkční, spolehlivý a uživatelsky vstřícný systém, který bude hladce integrován do boxu, čímž se udrží optimální podmínky pro skladování filamentů. Toto bude zahrnovat výběr vhodných senzorů, mikrokontroleru a dalších elektronických komponent, stejně jako vývoj potřebného softwaru pro řízení systému.

#### 4.3.1 Výběr mikrokontroleru

Výběr vhodného mikrokontroleru je velice důležitý faktor této bakalářské práce. Po vyhodnocení různých kritérií byl pro systém skladování filamentů vybrán mikroprocesor ESP32.

Obrázek č. 6 ESP32



Zdroj:[16]

- **Cenová dostupnost:**

ESP32 nabízí ve srovnání s jinými platformami velice nízkou cenu, proto je pro tento specifický projekt cenově dostupnou volbou bez větších kompromisů ve funkci, či výpočetním výkonu.

- **Výpočetní výkon:**

ESP32 je vybaven výkonným dvoujádrovým procesorem LX6 s taktovací frekvencí až 240 MHz, což je více než dostatečné pro správu řídicí elektroniky, senzorů a uživatelského rozhraní. ESP32 je také vybaven až 520 KB paměti SRAM a obvykle obsahuje 4 MB až 16 MB flash paměti, což poskytuje dostatek úložného prostoru pro kód, a zpracování dat v reálném čase.

- **Bezdrátové připojení:**

ESP32 je vybaven integrovaným rozhraním Wi-Fi a Bluetooth, které umožňují bezdrátovou komunikaci s jinými zařízeními a případné vzdálené monitorování a ovládání systému.

- **Možnost rozšíření:**

Desky ESP32 poskytují dostatečný GPIO pinů a podporu pro širokou škálu periférií, což zajišťuje kompatibilitu s požadovanými senzory, displeji a vstupními zařízeními pro náš systém pro ukládání filamentů.

- Aktivní komunita a podpora:

Platforma ESP32 velkou komunitu, která programátorům nabízí široké množství inspiračních zdrojů a OpenSource knihoven, což může významně pomoci při vývoji a řešení úloh.

- Kompatibilita s vývojovými prostředími:

ESP32 lze programovat ve vícero vývojových prostředích, jako je například Espressif IDE, Arduino IDE, VSCode, VisualStudio. Tímto zpřístupňuje a zjednodušuje vývojový proces těm, kteří již mají s Arduinem zkušenosti.

Vzhledem k těmto faktorům se ESP32 jeví jako vhodná volba, protože poskytuje cenově dostupnou, ale výkonnou platformu s řadou žádaných funkcí a silnou komunitní podporou.

Tabulka č. 4 Porovnání mikroprocesorů

MCU	Arduino Uno	ESP32	Raspberry Pi Zero W	Raspberry Pi Pico W
CPU	ATmega328P @ 16 MHz Jedno-jádrová	Xtensa LX6 @ 80-240 MHz Dvou-jádrový	ARM1176JZF-S @ 1 GHz Jedeno-jádrový	Cortex-M0+ RP2040 @ 133 MHz Dvou-jádrový
Paměť	32 KB Flash, 2 KB SRAM	520 KB SRAM, 4 MB Flash	512 MB RAM	264 KB SRAM, 2 MB Flash
GPIO piny	14	36	40	26
Podpora I2C	Ano	Ano	Ano	Ano
Konektivita	USB	Wi-fi, Bluetooth, USB	Wi-Fi, USB	Wi-Fi, USB
Základní programovací jazyk	C/C++ Python	C/C++, MicroPython	C/C++, Python, Scratch	C/C++ CircuitPython
Základní programovací prostředí	Arduino IDE	Espressif IDE	Raspberry Pi OS	Raspberry Pi Pico SDK / Thonny Python IDE
Cena [Kč]	700	200	400	200
Dostupnost	Dobrá	Dobrá	Nedostupné	Dobrá

Zdroj: Vlastní zpracování dat ze zdrojů [17] – [21]

### 4.3.2 Výběr vysoušedla

Vhodný výběr vysoušedla je důležité pro zajištění optimální kontroly vlhkosti a zachování kvality uložených filamentů v boxu. Mezi různými vysoušecími materiály byl silikagel vybrán pro tuto práci jako nejvhodnější volba.

- Vysoká adsorpční kapacita:

Silikagel má vysokou adsorpci vlhkosti, což mu umožňuje účinně odstraňovat vlhkost z okolního vzduchu a udržovat nízkou úroveň vlhkosti v systému pro skladování filamentů. Tato vysoká adsorpční kapacita je rozhodující pro zabránění degradace filamentů v důsledku působení vlhkosti.

- Opakované použití:

Silikagel je regenerovatelný vysoušecí prostředek, což znamená, že jej lze vysušit a opakovaně použít, aniž by došlo k výrazné ztrátě jeho adsorpční kapacity. Díky této vlastnosti je silikagel nákladově efektivní a ekologickou volbou, protože snižuje potřebu časté výměny vysoušedla.

- Netoxický a chemicky inertní:

Silikagel je netoxický a chemicky inertní materiál, což zajišťuje, že nereaguje s uloženými materiály a neuvolňuje žádné škodlivé látky. Tato vlastnost přispívá k bezpečnosti a spolehlivosti systému.

- Indikační vlastnosti:

Některé druhy silikagelu obsahují indikační látky citlivé na vlhkost, které mění barvu při nasycení vysoušedla. Tato vlastnost umožňuje snadné vizuální sledování účinnosti silikagelu a v případě potřeby včasnou výměnu nebo regeneraci.

- Dostupnost:

Silikagel je široce dostupný a relativně levný vysoušecí materiál, což z něj činí praktickou volbu.

Tabulka č. 5 Porovnání vysoušedel

Vlastnost	Silikagel	Chlorid výpenatý	Aktivní uhlí
Absorpční kapacita	Až 40 % své váhy ve vlhkosti	Až 30 % své váhy ve vlhkosti	Až 5 % své váhy ve vlhkosti
Možnost znovupoužití	Ano	Ano	Ano
Metoda regenerace	Ohřev v troubě nebo mikrovlnné troubě	Ohřev v troubě nebo mikrovlnné troubě	Ohřev v troubě nebo mikrovlnné troubě

Indikace vlhkosti	Změní barvu při nasycení	Uvolnění vody při nasycení	Neindikuje nasycení
Toxicita	Nejedovatý	Mírně jedovatý	Nejedovatý
Typické použití	V malých pytlíčcích při přepravě zboží	Absorpce vlhkosti ve vzduchu	Odstraňování vlhkosti a pachu z oblečení

Zdroj: Vlastní zpracování dat ze zdrojů [8], [22], [23]

### 4.3.3 Výběr topného zařízení

Výběr optimální ohřívací jednotky je zásadní pro udržení ideální teploty boxu, čímž se zajistí, že materiály zůstanou v nejlepší možné stavu. Po vyhodnocení různých řešení ohřevu byl jako nejvhodnější volba pro tento projekt PTC (Positive Temperature Coefficient) ohřivač.

- Samoregulační vlastnosti:

PTC ohřivače jsou samoregulační, což znamená, že jejich odpor roste s teplotou, což vede k poklesu topného výkonu s rostoucí teplotou. Tato vlastnost zajišťuje stálý topný výkon bez rizika přehřátí a poskytuje lepší kontrolu teploty v boxu.

- Bezpečnost:

Samoregulační charakter PTC ohřivačů výrazně snižuje riziko přehřátí a potenciálního nebezpečí požáru.

- Životnost a spolehlivost:

PTC ohřivače jsou známé svou odolností a dlouhou životností, což z nich činí spolehlivou volbu. Vyžadují minimální údržbu a vydrží nepřetržitý provoz potřebný k udržení optimální teploty v boxu.

- Snadná integrace:

PTC ohřivače se dodávají v různých velikostech a tvarech, což umožňuje snadnou integraci do skříňového systému pro skladování Filamentů.

Tabulka č. 6 Porovnání způsobů vyhřívání

Topné zařízení	PTC ohřivač	Keramický ohřivač	Infračervený ohřivač	Topný kabel
Napětí [V]	12-48 DC	110-240 AC	110-240 AC	5-240 DC/AC
Regulace teploty	Dobrá, možnost samoregulace	Dobrá, s externí regulací	Dobrá, s externí regulací	Dobrá, s externí regulací
Účinnost [%]	~90	~70-80	~85-95	~60-75
Doba ohřevu [min]	1-5	2-6	3-10	5-15
Bezpečnost	Nízké riziko přehřátí	Střední riziko přehřátí	Střední riziko přehřátí	Střední riziko přehřátí

Snadnost integrace	Velice lehké	Střední	Obtížná	Střední
Velikost	Kompaktní	Kompaktní	Nekompaktní	Kompaktní

Zdroj: Vlastní zpracování

#### 4.3.4 Měřící senzor

Výběr vhodného čidla teploty a vlhkosti je nezbytný pro účinné sledování a řízení podmínek prostředí v systému skladování filamentů. Po zvážení různých možností snímačů byl jako nejvhodnější pro tento projekt určen snímač BME280.

- Kombinované snímání teploty a vlhkosti

Snímač BME280 nabízí výhodu měření teploty i vlhkosti v jediném balení, což zjednodušuje proces monitorování a snižuje počet potřebných komponent v systému.

- Snadné nastavení a komunikace

Senzor BME280 využívá komunikační protokol I2C, který zjednodušuje proces nastavení a umožňuje jednoduchou integraci s ESP32. Protokol I2C také umožňuje použití více senzorů na stejné komunikační sběrnici, čímž se minimalizuje potřebné zapojení a počet pinů GPIO.

- Vysoká přesnost a rozlišení

BME280 poskytuje měření teploty a vlhkosti s přesností  $\pm 0,5$  °C a  $\pm 3$  % relativní vlhkosti. Kromě toho se může pochlubit vysokým rozlišením 0,01 °C pro teplotu a 0,008 % RH pro vlhkost, což zajišťuje přesná měření.

- Nízká doba odezvy:

S dobou odezvy 1 sekundy dokáže BME280 rychle detekovat změny podmínek prostředí, což je nezbytné pro monitorování a řízení systému skladování vláken v reálném čase.

- Kompaktní rozměry a nízká spotřeba energie:

Snímač BME280 je díky svým kompaktním rozměrům a nízké spotřebě energie ideální volbou pro systém skladování filamentů, kde je rozhodujícím faktorem prostor a energetická účinnost.

Tabulka č. 7 Porovnání senzorů vlhkosti a teploty

Senzor	DHT11	DHT22	BME280	SHT31	HTU21D	AM2320
Teplotní rozsah [°C]	0-50	-40-80	-40-85	-40-125	-40-125	-40-80
Přesnost měření teploty [°C]	$\pm 2$	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$

Rozlišení měření teploty [°C]	1	0.1	0.01	0.015	0.01	0.1
Rozsah měření vlhkosti [%RV]	20-80	0-100	0-100	0-100	0-100	0-99.9
Přesnost měření vlhkosti [% RV]	±5	±2	±3	±2	±2	±3
Rozlišení měření vlhkosti [% RV]	1	0.1	0.008	0.01	0.04	0.1
Zapojení	1 Wire	1 Wire	I2C/SPI	I2C	I2C	I2C
Napájecí napětí [V]	3-5.5	3-5.5	1.71-3.6	2.4-5.5	2.1-3.6	3.1-5.5
Doba odezvy [s]	1-2	2	1	0.5	2	5

Zdroj: Vlastní zpracování dat ze zdrojů[24] – [29]

#### 4.3.5 Regulace

Výběr optimálního regulačního systému je zásadní pro efektivní řízení a udržování požadované teploty v boxu. Po pečlivém zvážení různých možností byla jako nejvhodnější přístup k řízení topné jednotky v tomto projektu identifikována kombinace desky MOSFET a PID řízeného PWM signálu z ESP32.

- Přesné řízení:

PID (Proportional-Integral-Derivative) řídicí algoritmus implementovaný v kódu umožňuje přesnou regulaci teploty pomocí plynulé úpravy PWM (Pulse Width Modulation) signálu podle naměřených veličin uvnitř boxu. Výsledkem je přesná a stabilní regulace veličin, která zajišťuje optimální podmínky.

- Energetická účinnost:

Použití PWM pro řízení ohřívače umožňuje energeticky účinný provoz, protože výkon ohřívače je modulován podle požadavků na teplotu, což snižuje spotřebu energie a celkové provozní náklady

- Snadná implementace:

ESP32 může jednoduše ovládat MOSFET modul pomocí jednoho z mnoha PWM GPIO pinů

Obrázek č. 7 MOSFET modul



Zdroj: [30]

#### 4.3.6 Napájení systému

Výběr optimálního zdroje napájení je rozhodující pro zajištění spolehlivého a efektivního provozu. Po vyhodnocení různých možností napájení byl jako nejvhodnější volba pro tento projekt určen upravený napájecí zdroj pro PC, a to vzhledem k jeho schopnosti poskytovat více napájecích napětí.

- Více napěťových výstupů:

Napájecí zdroje PC jsou navrženy tak, aby poskytovaly různá výstupní napětí, například 3,3 V, 5 V a 12 V, která jsou potřebná k napájení součástí systému pro ukládání filamentů.

- Vysoká proudová zatížitelnost:

Napájecí zdroje pro PC mají obvykle vysokou proudovou kapacitu, která zajišťuje, že mohou dostatečně napájet více zařízení bez rizika přetížení nebo poklesu napětí. Obzvláště 12V větve zdroje bude vysoce vytížena PTC topným tělesem.

- Cenově výhodné řešení:

Tyto zdroje napájení jsou běžně dostupné a často je lze získat z vyřazených nebo vyřazených počítačů, což může snižuje celkové náklady na projekt.

- Bezpečnostní prvky:

Napájecí zdroje PC jsou vybaveny různými bezpečnostními prvky, jako je ochrana proti přepětí, nadproudu a zkratu, které přispívají k celkové bezpečnosti a spolehlivosti systému.

- Snadná integrace:

Úprava počítačového zdroje napájení tak, aby vyhovoval požadavkům této bakalářské práce může být poměrně jednoduchá a standardní konektory zdroje napájení lze přizpůsobit pro připojení k různým součástem systému.

Obrázek č. 8 Silentium PC zdroj



Zdroj: [31]

## 4.4 Software

Účinnost systému pro ukládání filamentů do značné míry závisí na jeho schopnosti udržovat optimální podmínky uvnitř boxu. Klíčovou roli při dosažení tohoto cíle hraje robustní a efektivní softwarová implementace, která řídí námi vybrané hardwarové komponenty. Tato část práce se bude zabývat vývojem softwaru pro MCU ESP32 se zaměřením na měření a regulaci teploty a vlhkosti, uživatelská rozhraní a komunikační protokoly.

### 4.4.1 Měření a regulace

Přesné měření podmínek prostředí uvnitř boxu a účinná regulace teploty a vlhkosti je další důležitá část systému pro skladování filamentů.

- Čtení dat ze snímače BME280

Senzor BME280, který měří teplotu a vlhkost, je připojen k ESP32 prostřednictvím sběrnice I2C. Protokol I2C umožňuje efektivní komunikaci mezi senzorem a MCU a zároveň minimalizuje potřebný počet propojovacích vodičů.

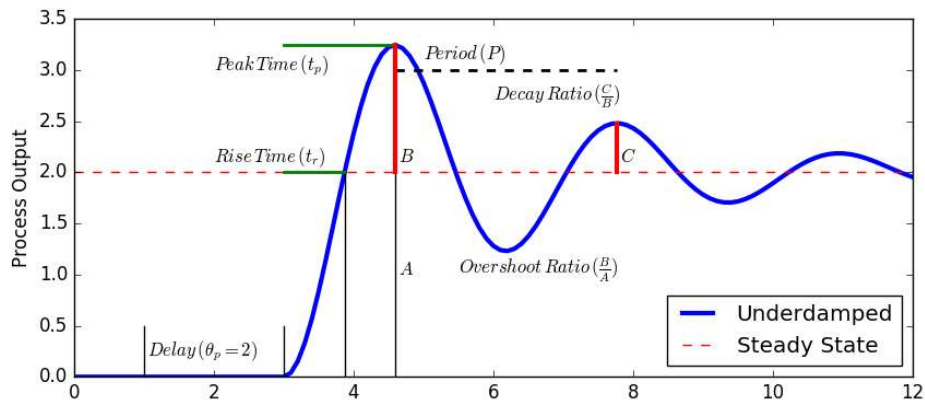
ESP32 nepřetržitě čte data ze snímače BME280, což umožňuje sledovat vnitřní podmínky v reálném čase. Data získaná ze snímače jsou následně zpracována a využita při regulaci topné jednotky.

- Algoritmus PID regulace

Pro udržování požadované teploty a vlhkosti v boxu je implementován PID řídicí algoritmus. Tento algoritmus vypočítává chybu mezi požadovanými a naměřenými hodnotami a podle toho upravuje výstup na MOSFET. Tři složky regulátoru – proporcionální, integrální a derivační – spolupracují na minimalizaci chyby a zajišťují stabilní a účinný regulační mechanismus.



Obrázek č. 9 demonstrace PID algoritmu



Zdroj: [32]

- Řízení ohřívače pomocí MOSFETu

Výstupní signál PID algoritmu se používá k řízení topné jednotky prostřednictvím MOSFETu. Pomocí PWM se reguluje výkon topného tělesa, což umožňuje přesné řízení.

#### 4.4.2 Webserver

Aktualizace v reálném čase jsou klíčové pro udržení optimálních podmínek prostředí a efektivní softwarové řešení hraje při dosahování tohoto cíle významnou roli. Použití asynchronního webového serveru jako páteře softwarové architektury zajišťuje bezproblémovou komunikaci mezi ESP32 a uživatelskými rozhraními a zároveň poskytuje kontrolu nad provozem systému v reálném čase. Asynchronní povaha webového serveru umožňuje současné zpracování příchozích požadavků a systémových úloh, což umožňuje rychlou odezvu systému.

- Paralelizace

Asynchronní webové servery mohou zpracovávat více současných připojení, aniž by se snížil výkon systému. Použití asynchronního webového serveru zajišťuje, že k informacím systému může přistupovat více uživatelů a ovládat jeho nastavení současně, aniž by to mělo vliv na řízení a monitorování regulace teploty a vlhkosti v reálném čase.

- Rychlost odezvy

Asynchronní provoz umožňuje webovému serveru zpracovávat příchozí požadavky bez blokování jiných úloh, což umožňuje ESP32 udržovat v reálném čase řízení topné jednotky, snímače teploty a vlhkosti a dalších součástí systému a současně obsluhovat požadavky uživatelů.

- Snadná integrace

Využití asynchronního webového serveru zjednodušuje integraci různých komponent v rámci softwarového zásobníku, jako je zpracování dat, ověřování uživatelů a komunikace s externími zařízeními nebo službami.

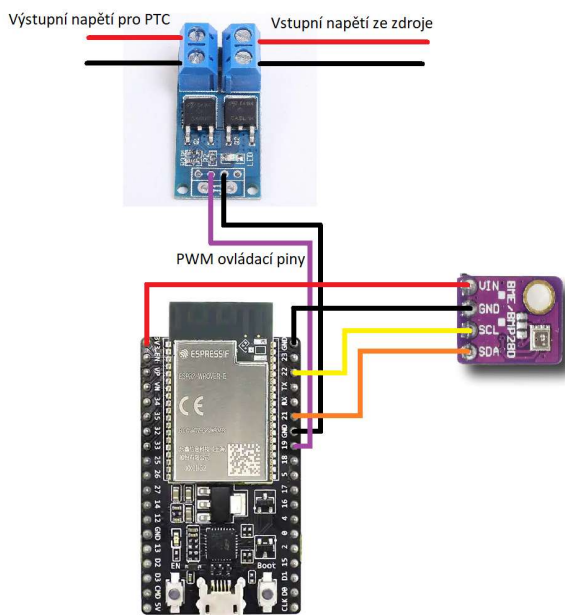
- **Multiplatformní**

Asynchronní webový server usnadňuje vytváření uživatelských rozhraní nezávislých na platformě, například webových stránek, nebo mobilních aplikací. Umožňuje tak uživatelům přistupovat k systému z libovolného zařízení s webovým prohlížečem.

## 4.5 Schéma zapojení

V navrženém schématu zapojení slouží ESP32 jako centrální procesorová jednotka, která je zodpovědná za sběr dat ze senzoru, jejich zpracování a přenos do frontendu prostřednictvím HTML. Senzor BME280 je k MCU připojen pomocí komunikačního protokolu I2C, který usnadňuje efektivní přenos dat s minimálním zapojením. Mosfetový spínač je využit k spínání PTC členu pro vyhřívání boxu.

Obrázek č. 10 Schéma zapojení



Zdroj: Vlastní zpracování

## 4.6 Implementace kódu

Kód pro tuto práci je rozdělen do dvou částí: hlavní kód, který ovládá ESP32, a soubor HTML, který je zodpovědný za webové rozhraní. Systém umožňuje uživateli spouštět a zastavovat sušicí cykly prostřednictvím webového rozhraní. ESP32 se programuje pomocí prostředí Arduino IDE.

- Hlavní kód

Hlavní kód je zodpovědný za ovládání ESP32. Používá různé knihovny, například ESPAsyncWebServer, SPIFFS, Adafruit\_Sensor, Adafruit\_BME280 a PID\_v1. Tyto knihovny slouží k provádění úloh, jako je vytvoření asynchronního webového serveru, zpracování dat ze senzoru BME280 a řízení ohřívače pomocí regulátoru PID.

Kód inicializuje různé proměnné, jako například cílovou teplotu, pin pro ovládání mosfetu a parametry ladění PID. Definuje také řadu funkcí, které se používají ke čtení dat ze snímače BME280, ovládání ohřívače, zpracování požadavků webového serveru a řízení cyklů sušení.

- Setup()

Funkce setup() inicializuje sériovou komunikaci, čidlo BME280, souborový systém SPIFFS a regulátor PID. Nastavuje také připojení Wi-Fi a definuje trasy pro webový server. Tyto trasy slouží ke zpracování požadavků ze souboru HTML a ke spuštění příslušných funkcí.

- Loop()

Funkce main loop() průběžně kontroluje, zda je cyklus sušení aktivní, a podle toho řídí ohřívač. Vypočítá také uplynulý čas aktivního sušicího cyklu.

- Struktura a prvky jazyka HTML

Tato část obsahuje základní strukturu HTML spolu se záhlavím, několika prvky div pro umístění tlačítek, výběr a grafy teploty a vlhkosti. Malé množství CSS se používá ke stylizaci stránky, aby byla vizuálně přitažlivá a zajistila správné zarovnání grafů.

- JavaScript

Hlavní část souboru HTML je věnována jazyku JavaScript, který je zodpovědný za vytváření a aktualizaci grafů. Nejprve je zahrnuta knihovna Highcharts, která poskytuje funkce potřebné k vytváření grafů teploty, vlhkosti a tlaku. Pomocí Highcharts jsou vytvořeny dvě konfigurace grafů – jedna pro teplotu, jedna pro vlhkost. Tyto konfigurace

určují, jak budou grafy vypadat a jak se budou chovat včetně typu grafu, názvů os a rozsahů hodnot. Je definována funkce s názvem `getData()`. Tato funkce načte data snímače ze serveru pomocí rozhraní Fetch API a vrátí je jako objekt obsahující hodnoty teploty, vlhkosti a tlaku.

Nakonec je přidán posluchač události `DOMContentLoaded`, aby bylo zajištěno, že se kód JavaScriptu spustí až po načtení celého dokumentu HTML. Tento posluchač událostí volá funkci `refreshCharts()` pro inicializaci a aktualizaci grafů s nejnovějšími údaji ze senzorů.

Kombinací těchto komponent je soubor HTML schopen vytvořit interaktivní přístrojovou desku, která zobrazuje data senzorů v reálném čase ve formě tří grafů: teploty, vlhkosti a tlaku. Grafy se automaticky obnovují a poskytují průběžně aktualizovaný pohled na údaje ze snímačů.

## 5 Výsledky a jejich zhodnocení

V následující části uvádíme výsledný produkt a zhodnotíme naplnění cílů zadání bakalářské práce.

### 5.1 Zhodnocení funkčnosti

Pro ověření funkčnosti komory pro ukládání filamentů pro 3D tisk byly použity filamenty s různými charakteristikami absorpce vlhkosti. Komora účinně udržovala teplotu a vlhkost v požadovaném rozmezí, čímž zajistila optimální podmínky pro skladování filamentů. Uživatel si může vybrat mezi třemi přednastavenými režimy vysoušení a skrz webovou stránku získávat data v reálném čase, a to jak na osobním počítači, tak na mobilním zařízení se systémem android.

Nicméně menší jsou zde vidět menší neduhy. Teplota v určitém stádiu vyhřívání klesá pod požadovanou hodnotu a v závislosti na to se zvyšuje relativní vlhkost uvnitř boxu. Je možné, že komora nebyla dostatečně utěsněna, nebo nebyly zvoleny správné parametry PID regulace. S další úpravou boxu, či PID parametrů by tyto neduhy měly být odstraněny.

Na základě těchto výsledků můžeme konstatovat, že zařízení splňuje očekávání, ale bylo by vhodné pokračovat v optimalizaci návrhu.

Obrázek č. 11 Zobrazení funkcionality boxu



Zdroj: Vlastní zpracování

## 5.2 Ekonomické zhodnocení

Pokud budeme brát v úvahu ceny, za které byly nakoupeny komponenty v době zpracování bakalářské práce, vyšla konstrukce boxu na 3330 Kč bez započtení ceny za práci.

Tabulka č. 8 Náklady na materiály

Položka	Cena [Kč]
Sada hliníkových profilů	1 016,65
ACP panel 1500x1000 mm	1 058,15
Sada m3 matic do T-slotu	114

Sada m3 šroubů	86
Sada m4 šroubů	73,2
ESP32	228
BME280	188
PWM MOSFET modul	128
Smršťovací bužírka 5 mm – 1 metr	18
Smršťovací bužírka 8 mm – 1 metr	20
Počítačový zdroj	-
Celkové náklady na tištěné díly	400
Celkem	3 330

*Zdroj: Vlastní zpracování*

## 6 Závěr

Na závěr lze konstatovat, že cíl této bakalářské práce, vytvořit spolehlivý a účinný systém pro ukládání filamentu pro 3D tisk, byl splněn. Díky rešerši a analýze stávajících řešení na trhu se nám podařilo navrhnout funkční a cenově výhodný systém, který splňuje potřeby nadšenců do 3D tisku.

Konstrukce systému zahrnovala použití hliníkových profilů a hliníkových kompozitních panelů, které zajišťovaly potřebnou pevnost a izolační vlastnosti. Hardwarové komponenty zahrnovaly PTC topné těleso pro regulaci teploty, senzor BME280 pro měření teploty a vlhkosti a silikagelový vysoušeč pro kontrolu vlhkosti.

Kromě toho jsme vyvinuli software, který umožňoval sledování a ovládání systému v reálném čase prostřednictvím asynchronního webserveru, k němuž lze přistupovat prostřednictvím počítače nebo zařízení se systémem Android. Systém byl vyhodnocen prostřednictvím řady testů, které prokázaly jeho schopnost udržovat teplotu a vlhkost v požadovaném rozsahu.

Celkově tato práce představuje kompletní řešení pro skladování filamentu pro 3D tisk, které kombinuje hardwarové i softwarové komponenty.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Ondřej Strítěský, *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Prusa Research a.s., 2019. Accessed: Mar. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.prusa3d.com/downloads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [2] W. Liu, J. Zhou, Y. Ma, J. Wang, and J. Xu, “Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 275, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/275/1/012033.
- [3] “What is 3D Printer Filament?” <https://www.raise3d.com/academy/what-is-3d-printer-filament/> (accessed Mar. 06, 2023).
- [4] “3D printing materials: Filaments and filament production.” <https://ultimaker.com/learn/3d-printing-materials-filaments-and-filament-production> (accessed Mar. 06, 2023).
- [5] “The Importance of High Quality 3D Printer Filament – Boots Industries.” <http://bootsindustries.com/the-importance-of-high-quality-3d-printer-filament/> (accessed Mar. 29, 2023).
- [6] R. Wichniarek, A. Hamrol, W. Kuczko, F. Górski, and M. Rogalewicz, “ABS filament moisture compensation possibilities in the FDM process,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 35, pp. 550–559, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2021.08.011.
- [7] A. Hamrol, B. Góralski, R. Wichniarek, and W. Kuczko, “The Natural Moisture of ABS Filament and Its Influence on the Quality of FFF Products,” *Materials*, vol. 16, no. 3, p. 938, Jan. 2023, doi: 10.3390/MA16030938.
- [8] “Tips on Keeping Your 3D Printing Filament Dry - 3D Insider.” <https://3dinsider.com/dry-3d-printing-filament/> (accessed Mar. 28, 2023).
- [9] “KIT RepBox v2.5+ Build Your Own: ‘THE’ 3D Printing Filament Management – Repkord.com.” <https://www.repkord.com/collections/repbox-2/products/repbox-2-the-3d-printing-spool-management-solution?variant=11260257992740> (accessed Mar. 29, 2023).
- [10] “Apium F300 Filament Dryer - Increases the success rate of 3D printing.” <https://apiumtec.com/en/apium-f300-filament-dryer> (accessed Mar. 31, 2023).
- [11] “Blind Joint Parts - Tapping Joints | MISUMI | MISUMI.” [https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300464310/?curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110300464310%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a%2260%22%7d&Tab=wysiwyg\\_area\\_3](https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300464310/?curSearch=%7b%22field%22%3a%22%40search%22%2c%22seriesCode%22%3a%22110300464310%22%2c%22innerCode%22%3a%22%22%2c%22sort%22%3a1%2c%22specSortFlag%22%3a0%2c%22allSpecFlag%22%3a0%2c%22page%22%3a1%2c%22pageSize%22%3a%2260%22%7d&Tab=wysiwyg_area_3) (accessed Mar. 29, 2023).
- [12] “Plný polykarbonát čirý 3 mm s UV | Multiplast.” <https://www.multiplast.cz/eshop/plne-polykarbonatove-desky-cire-130/plny-polykarbonat-ciry-3-mm-s-uv-230> (accessed Mar. 29, 2023).
- [13] “Plexisklo čiré 3 mm PLEXIGLAS® lité | Multiplast.” <https://www.multiplast.cz/eshop/transparentni-plexisklo-58/plexisklo-cire-3-mm-plexiglas-gs-282> (accessed Mar. 29, 2023).
- [14] “Kompozitní desky NEOBOND barevné odstíny RAL | Multiplast.” <https://www.multiplast.cz/eshop/hlinikove-kompozitni-desky-neobond-104/kompozitni-desky-neobond-v-barve-645> (accessed Mar. 29, 2023).

- [15] “ROZDÍL MEZI PLEXISKLEM A POLYKARBONÁTEM - Elventa-shop.” <https://www.elventa-shop.cz/rubriky/uzitecne-informace/plexisklo-vs--polykarbonat/> (accessed Mar. 29, 2023).
- [16] “IoT ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth rev.1, CP2102 | LaskaKit.” <https://www.laskakit.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/> (accessed Mar. 29, 2023).
- [17] “ESP32 Technical Reference Manual About This Manual,” 2022, Accessed: Mar. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
- [18] “Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi Pico and Pico W.” <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberrypi-pico.html> (accessed Mar. 29, 2023).
- [19] “Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi hardware.” <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberrypi.html#raspberrypi-zero-w> (accessed Mar. 29, 2023).
- [20] “Arduino Uno Rev3 — Arduino Official Store.” <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (accessed Mar. 29, 2023).
- [21] “Buy a Raspberry Pi Zero – Raspberry Pi.” <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-zero/> (accessed Mar. 29, 2023).
- [22] “Calcium Chloride – Uses, Production, Melting and Boiling Point.” <https://www.vedantu.com/chemistry/calcium-chloride> (accessed Mar. 28, 2023).
- [23] “Pohlčovače vlhkosti | Alza.cz.” <https://www.alza.cz/maxi/pohlcovace-vlhkosti/18857630.htm> (accessed Mar. 28, 2023).
- [24] “Compare DHT22, AM2302, AM2320, AM2321, SHT71, HTU21D, Si7021, BME280.” [https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib\\_many.html](https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_many.html) (accessed Mar. 06, 2023).
- [25] D-Robotics, “DHT11 Humidity & Temperature Sensor”.
- [26] T. Liu, “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) Capacitive-type humidity and temperature module/sensor”.
- [27] “BME280-Data sheet,” 2018.
- [28] “HTU21D(F) Sensor Digital Relative Humidity sensor with Temperature output”, Accessed: Mar. 31, 2023. [Online]. Available: [www.meas-spec.com](http://www.meas-spec.com)
- [29] “Digital Temperature and Humidity Sensor AM2320 Product Manual”.
- [30] “PWM MOSFET modul LR7843, 30VDC 161A | LaskaKit.” <https://www.laskakit.cz/pwm-mosfet-modul-lr7843--30vdc-161a/> (accessed Mar. 29, 2023).
- [31] “S12II.” <https://seasonic.com/s12ii#gallery> (accessed Mar. 29, 2023).
- [32] “Arduino Temperature PID Control.” <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoControl> (accessed Mar. 29, 2023).



## **8 Přílohy**

Následující přílohy byly vloženy do informačního systému.

**Cad soubor s návrhem boxu**

**Arduino IDE soubor s kódem pro ESP32**

**HTML soubor s kódem pro webovou stránku**