



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky**

Bakalářská práce

Autonomní pěstební jednotka

Vít Ramba

Květen 2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ramba** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **492380**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Autonomní pěstební jednotka

Název bakalářské práce anglicky:

Autonomous Growing Unit

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a implementace autonomního systému, který umožní pěstování rostlin bez potřeby obsluhy. Při vypracování se řiďte následujícími pokyny:

- 1) Prostudujte dostupnou literaturu a vypracujte rešerši na dané téma
- 2) Na základě studie navrhnete a implementujete jednotku, která umožní řízení klimatických podmínek vhodných pro růst rostlin v uzavřeném prostoru (boxu). Jednotka bude umožňovat řízení vlhkosti a závlivky rostlin. Informace o podmínkách uvnitř boxu budou předávány uživateli prostřednictvím lokálního displeje.
- 3) Zařízení otestujte v reálném provozu a porovnejte vaše řešení s komerčně dostupnými přístroji.

Seznam doporučené literatury:

- [1] SHAMSHIRI, Redmond R. (ed.). Next-Generation Greenhouses for Food Security. BoD—Books on Demand, 2021.
[2] HEGAZY, Anwar. Conceptual Design of a Self-Sufficient Agricultural Greenhouse. 2022. PhD Thesis. ResearchSpace@Auckland

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2023/2024

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, veškeré rady, které mi poskytl a za to, že byl k dispozici vždy, když jsem potřeboval při práci pomoc.

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.

V Praze dne 26. 5. 2023

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se zabývá návrhem a implementací malého uzavřeného skleníku určeného k pěstování rostlin. Dále se zabývá návrhem jednotky, která umožňuje řízení klimatických podmínek, respektive parametrů prostředí, vhodných pro růst rostlin. Podstatná část práce je věnována systému řízení vlhkosti uvnitř navrženého skleníku. Jeho hlavní součástí je námi navržený odvlhčovač využívající termoelektrický jev. V rámci práce jsme otestovali několik verzí tohoto odvlhčovače a popsali jeho výhody i nedostatky.

Klíčová slova: skleník, růstová komora, zemědělství s řízeným prostředím, řízení vlhkosti, odvlhčovač vzduchu

This thesis describes the design and implementation of a small fully closed greenhouse for growing various plants. It also deals with the design of a unit that enables the control of climatic conditions and other environmental parameters, which affect plant growth. A substantial part of the thesis is devoted to the humidity control system inside the greenhouse. Its main component is a thermoelectric dehumidifier, which we designed. We have tested several versions of this dehumidifier and described its advantages and shortcomings.

Keywords: greenhouse, growth chamber, controlled-environment agriculture, humidity control, dehumidifier

Title translation: Autonomous Growing Unit

Obsah /

1 Úvod	1
2 Řízené prostředí v zemědělství	2
2.1 Teplota vzduchu	2
2.2 Relativní vlhkost vzduchu	2
2.2.1 Kompresorové odvlhčovače	2
2.2.2 Odvlhčovače využívající termoelektrický jev	3
2.2.3 Adsorpční odvlhčovače	3
2.3 Rozdíl tlaku vodních par	4
2.4 Osvětlení	4
2.5 Koncentrace oxidu uhličitého	4
2.6 Další faktory	5
3 Komerční řešení	8
3.1 Plantee	8
3.2 Binder	9
3.3 Freight Farms	10
3.4 Laboratory Biosphere	11
4 Autonomní pěstební jednotka	13
5 Hardware	14
5.1 Použité senzory	14
5.1.1 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu DHT22	14
5.1.2 Senzor vlhkosti půdy	14
5.2 Skleník	14
5.3 Odvlhčovač	15
5.4 Osvětlení	16
5.5 Zavlažování	16
5.6 Řídící jednotka	16
5.6.1 Arduino MEGA 2560	18
5.6.2 Relé	18
5.6.3 LCD displej	18
5.6.4 Čtečka SD karty	18
5.6.5 Hodiny reálného času	18
5.7 Napájení	19
5.7.1 Zdroj 12 V	19
5.7.2 Zdroj 5 V	19
5.8 Schéma zapojení	19
6 Software	22
6.1 Struktura programu	22
6.1.1 Aktualizace času a načtení hodnot ze senzorů	22
6.1.2 Řízení osvětlení	22
6.1.3 Řízení odvlhčovače	23
6.1.4 Aktualizace LCD displeje	24
6.1.5 Uložení dat na SD kartu	24
7 Experimentální výsledky	25
7.1 Vysazení rostlin a uspořádání skleníku	25
7.2 Testy odvlhčovače	26
7.2.1 Odvlhčovač 1.0	26
7.2.2 Odvlhčovač 1.1	28
7.2.3 Odvlhčovač 2.0	30
7.3 Zavlažování	32
8 Diskuze	34
8.1 Testy odvlhčovače	34
8.1.1 Odvlhčovač 1.0	34
8.1.2 Odvlhčovač 1.1	34
8.1.3 Odvlhčovač 2.0	34
8.2 Zavlažování	36
8.3 Osvětlení	37
8.4 Skleník	37
9 Závěr	38
Literatura	39
A Seznam elektronických příloh	41

Tabulky / Obrázky

2.1. Ideální podmínky pro pěstování rostlin	6
3.1. Porovnání růstových komor společnosti Binder	9
2.1. Schéma adsorpčního odvlhčovače	3
3.1. První verze skleníku Plantee	8
3.2. Nová verze skleníku Plantee	8
3.3. Pohled dovnitř růstové komory KBWF 240	9
3.4. Růstová komora KBW 720	9
3.5. Farma Greenery S v teplém prostředí	10
3.6. Farma Greenery S v chladném prostředí	10
3.7. Pohled dovnitř farmy Greenery S	10
3.8. Osvětlení uvnitř farmy Greenery S	10
3.9. Laboratory Biosphere	11
3.10. Půdorys Laboratory Biosphere	12
5.1. 3D model držáku pro odvlhčovač	15
5.2. Sestavený odvlhčovač	16
5.3. Řídící jednotka	17
5.4. Schéma sběrnice SPI	18
5.5. Zjednodušené schéma řídicí jednotky	20
5.6. Zjednodušené schéma periférií	21
6.1. Blokové schéma hlavní smyčky programu	23
6.2. Blokové schéma řízení osvětlení	24
6.3. Ukázka výpisu na LCD displeji	24
7.1. Ředkvičky ve skleníku 2 týdny od vysazení	25
7.2. Vývoj relativní vlhkosti vzduchu v uzavřeném skleníku bez odvlhčovače	26
7.3. Vývoj relativní vlhkosti vzduchu v uzavřeném skleníku s odvlhčovačem	27
7.4. Test odvlhčovače 1.0 v reálných podmínkách - relativní vlhkost vzduchu	28
7.5. Test odvlhčovače 1.0 v reálných podmínkách - teplota	28
7.6. Sestavený odvlhčovač 1.1	29

7.7.	Test odvlhčovače 1.1 v reálných podmínkách - relativní vlhkost vzduchu	29
7.8.	Test odvlhčovače 1.1 v reálných podmínkách - teplota	30
7.9.	Odvlhčovač 2.0	31
7.10.	Test odvlhčovače 2.0 v reálných podmínkách - relativní vlhkost vzduchu	31
7.11.	Test odvlhčovače 2.0 v reálných podmínkách - teplota	32
7.12.	Data ze senzoru vlhkosti půdy při testu odvlhčovače 1.1 ...	33
7.13.	Data ze senzoru vlhkosti půdy při testu odvlhčovače 2.0 ...	33

Kapitola 1

Úvod

Každá rostlina pro svůj správný růst vyžaduje specifický rozsah klimatických podmínek a dalších parametrů prostředí. Jde například o teplotu, relativní vlhkost vzduchu, spektrum a intenzitu světla nebo koncentraci oxidu uhličitého. Tradiční pěstování plodin, tedy například v případě zemědělství jde o pěstování na poli, neumožňuje dostatečnou kontrolu nad těmito podmínkami. Naproti tomu pěstování rostlin ve skleníku již jistou kontrolu poskytuje. Ať už jde o skleník jen s jednoduchým systémem řízení teploty pomocí větrání, anebo o pokročilejší systém, který umožňuje i řízení koncentrace oxidu uhličitého, hovoříme o řízeném prostředí. Udržení vhodných podmínek v daném rozsahu vede k efektivnějšímu pěstování, tedy větším, kvalitnějším plodinám vypěstovaným za nejkratší možnou dobu. V rámci práce tyto parametry blíže rozebereme a podíváme se na možné způsoby jejich řízení. Představíme také již existující návrhy komerčních a jiných systémů, které slouží k pěstování rostlin v řízeném prostředí.

Cílem práce je návrh a implementace autonomního systému, který umožní pěstování rostlin bez potřeby obsluhy. Na základě rešerše zvolíme vhodný návrh uzavřeného prostoru (skleníku), ve kterém bude možné pěstovat rostliny. Dále navrhne a implementujeme jednotku, která umožní řízení klimatických podmínek vhodných pro růst rostlin v tomto prostoru. Informace o podmínkách uvnitř skleníku budou předávány uživateli prostřednictvím lokálního displeje.

Kapitola 2

Řízené prostředí v zemědělství

Cílem zemědělství s řízeným prostředím (angl. Controlled Environment Agriculture - CEA) je vytvoření optimálních podmínek pro růst zemědělských plodin uvnitř skleníku či vnitřní farmy. Obecněji se CEA zabývá řízením daných parametrů prostředí, například teploty či vlhkosti vzduchu, v prostoru určeném pro pěstování rostlin. Rozsahy ideálních parametrů prostředí pro pěstování vybraných rostlin jsou uvedeny v tabulce 2.1 na straně 6. [1]

2.1 Teplota vzduchu

Teplota má významný vliv na většinu procesů, které v rostlině probíhají. Teplota vzduchu ovlivňuje míru fotosyntézy nebo rostlinného dýchání, ale také načasování jednotlivých fází růstu, jako je klíčení nebo fáze kvetení. [2]

V běžných sklenících, které disponují systémem pro řízení teploty vzduchu, se většinou nachází topení, které využívá teplovodního potrubí a výměníků tepla. V případě požadavku na snižování teploty uvnitř skleníku lze otevřít ventilační otvory a umožnit výměnu vzduchu mezi skleníkem a vnějším prostředím. Pokud to není praktické, například z důvodu vysoké teploty vně skleníku nebo vůbec možné, pokud má jít o uzavřený skleník, pak je využita klimatizace. [3]

2.2 Relativní vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu je poměr aktuálního množství vody ve vzduchu a maximálního možného množství vody, která může být ve vzduchu o stejné teplotě a tlaku obsažena. Uvnitř skleníku dochází k postupnému zvyšování relativní vlhkosti vzduchu vypařováním vody z půdy, transpirací, neboli vypařováním vody z listů rostlin, a také fotosyntézou, jejíž produktem je kromě sacharidů a oxidu uhličitého i voda. [2, 4]

Pro různé rostliny je vhodný opět různý rozsah hodnot relativní vlhkosti okolního vzduchu. Ta určuje míru transpirace, a tedy i množství rostlinou přijatých živin z půdy. Platí, že při vysoké relativní vlhkosti dochází ke zpomalení transpirace a přísunu živin. Naopak při nízké vlhkosti rostlina vysychá. Vysoká vlhkost uvnitř skleníku také zvyšuje riziko výskytu plísní a jiných chorob. [4]

Ke snížení vlhkosti se používají odvlhčovače, přičemž existují tři základní typy odvlhčovačů.

2.2.1 Kompresorové odvlhčovače

Kompresorové odvlhčovače využívají kompresor, který řídí tok chladicí kapaliny v uzavřeném okruhu. Chladicí kapalina prochází výparníkem, kde při svém vypařování odebírá teplo z okolí. Následně je stlačena v kondenzátoru a mění své skupenství zpět na kapalné, přičemž odevzdává teplo svému okolí. Na studeném vnějším povrchu výparníku dochází ke kondenzaci vodní páry obsažené ve vzduchu. Tím se snižuje množství vody ve vzduchu, což má za následek snížení relativní vlhkosti. [5]

Kompresorové odvlhčovače jsou i vzhledem ke svým rozměrům nejvhodnější pro velké prostory nebo při požadavku na odstranění velkého množství vody ze vzduchu. [6]

2.2.2 Odvlhčovače využívající termoelektrický jev

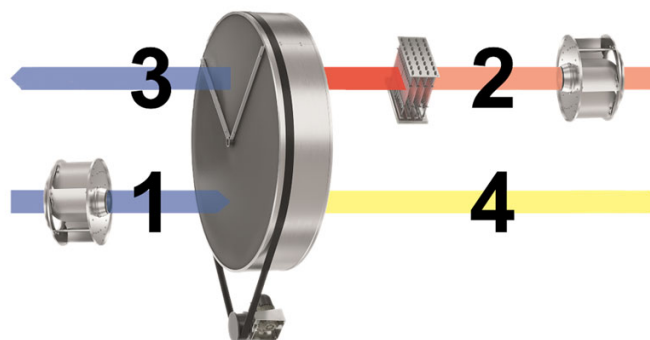
Odvlhčovače využívající termoelektrický jev jsou také označovány jako odvlhčovače s Peltierovým článkem. Tento článek obsahuje polovodiče, v nichž se při průchodu elektrického proudu přemísťují volné nabití částice, čímž dochází ke zvětšení termoelektrického napětí článku, které je přímo úměrné rozdílu teplot jeho dvou stran. Ke studené části připevněný chladič ochlazuje vzduch ve své bezprostřední blízkosti a na jeho povrchu dochází ke kondenzaci vodní páry. Stejným způsobem, jako v případě kompresorových odvlhčovačů dochází ke snížení relativní vlhkosti. Pro správné fungování odvlhčovače nesmí chladič studené strany článku zamrznat, ale zároveň musí být jeho teplota co možná nejnižší. Teplotu druhé strany článku, na které je teplo vyzařováno, je tedy nutné udržovat na dostatečně nízké hodnotě. Z toho důvodu je k této straně připevněn chladič s větrákem. [7, 6]

Výhodou tohoto typu odvlhčovače jsou jeho malé rozměry, tichý provoz a vzhledem k jeho jednoduchosti i vysoká spolehlivost. Další výhodou je nízká pořizovací cena, avšak v poměru na množství odebrané vody ze vzduchu vychází výrazně hůře, než kompresorové odvlhčovače, jejichž pořizovací cena je sice vyšší, ale dokáží za stejný čas odebrat ze vzduchu výrazně více vody. [6]

2.2.3 Adsorpční odvlhčovače

Adsorpční odvlhčovače využívají adsorpční materiál, typicky Zeolit, uložený v pomalu otáčejícím se rotoru. Větrákem usměrněný proudící vzduch prochází částí rotoru a dochází ke snížení obsahu vody ve vzduchu. Voda je z adsorpčního materiálu extrahována jeho zahřátím v části rotoru, kde nedochází k vysoušení vzduchu. Adsorpční materiál je znovupoužitelný, a není tedy nutné jej doplňovat či vyměňovat. [5]

Na obrázku 2.1 je znázorněno zjednodušené schéma adsorpčního odvlhčovače. V části označené číslem 1 vstupuje do rotoru vzduch o nějaké relativní vlhkosti. V části 4 tento vzduch rotor opouští s nižší relativní vlhkostí. V části 2 je do rotoru vháněn vzduch, jehož teplota je nejprve zvýšena pomocí topného tělesa. Tímto vzduchem je adsorpční materiál vysušen a vzduch opouští rotor v části 3. Je zřejmé, že vzduch v částech 2 a 3 musí být od vzduchu v částech 1 a 4 odizolován, jinak by k odvlhčování nedocházelo.



1. Process Air Inlet
2. Regeneration Air inlet
3. Regeneration Air outlet
4. Dry Process Air outlet

Obrázek 2.1. Schéma adsorpčního odvlhčovače [8]

Velkou výhodou adsorpčních odvlhčovačů je jejich schopnost dosáhnout výrazně nižší relativní vlhkosti vzduchu, a to i v případě nízké teploty odvlhčovaného vzduchu. [5]

2.3 Rozdíl tlaku vodních par

Veličina rozdíl tlaku vodních par (angl. Vapor Pressure Deficit - VPD) udává rozdíl mezi tlakem vodních par v maximálně nasyceném vzduchu v bezprostřední blízkosti listů rostlin a tlakem vodních par ve vzduchu. Oproti samotné relativní vlhkosti vzduchu lze pomocí VPD popsat přesun vody mezi bezprostředním okolím listů rostlin a okolním vzduchem. Díky VPD tedy lze přesněji určit míru transpirace, a tedy toho, jak rostliny reagují na vlhkost v pěstebním prostředí a efektivněji omezit rizikové faktory, které rostliny ohrožují. Každá rostlina vyžaduje různý rozsah hodnot VPD. Obecně platí, že ve fázi klíčení rostliny prosperují při nižší hodnotě VPD, než ve vegetativní fázi a ve fázi kvetení je vhodná naopak vyšší úroveň VPD, odpovídající nižší relativní vlhkosti vzduchu. [9–10]

VPD určíme ze vztahu

$$VPD = VP_{sat} - VP_{air},$$

kde

$$VP_{sat} = \frac{610.7 \cdot 10^{\frac{7.5T_{leaf}}{237.3+T_{leaf}}}}{1000},$$

a

$$VP_{air} = \frac{610.7 \cdot 10^{\frac{7.5T_{air}}{237.3+T_{air}}}}{1000} \cdot \frac{RH}{100},$$

kde T_{leaf} je teplota listu rostliny, T_{air} je teplota vzduchu a RH je relativní vlhkost vzduchu v procentech. VPD je udáváno v kilopascálech (kPa). [10]

2.4 Osvětlení

V uzavřených sklenících, do kterých se nedostává dostatečné množství světla ze Slunce, je nutné využít umělé osvětlení. Preferovaným druhem umělého osvětlení je technologie LED, která oproti žárovkám, zářivkám či obloukovým lampám nabízí řadu výhod. LED diody mají vyšší životnost a jsou energeticky úspornější než zmíněné alternativy. Rostliny preferují určité úseky elektromagnetického spektra, a to konkrétně červenou a modrou část viditelného světla. Použití LED osvětlení umožňuje vynechání jiných nepotřebných částí spektra, což vede k dalším energetickým úsporám. Další výhodou LED osvětlení je nízké množství vyzařovaného tepla, které by mohlo mít negativní vliv na pěstované rostliny a případně zvyšovat nárok na chlazení uvnitř skleníku. [1, 11]

2.5 Koncentrace oxidu uhličitého

Koncentrace CO_2 ve vzduchu má významný vliv na růst rostlin, a tedy i na výslednou úrodu. Zvýšená koncentrace CO_2 zvyšuje u rostlin míru fotosyntézy, což vede k větší produkci sacharidů, a tedy rychlejšímu růstu. Druhým důsledkem zvýšené koncentrace CO_2 je snížení míry transpirace, což znamená snížení spotřeby vody rostlinou. Řízení

koncentrace CO₂ je velkou výhodou uzavřených skleníků. Ačkoli je možné uměle zvyšovat koncentraci CO₂ i ve sklenících, které nejsou uzavřené, dochází tím k výrazným ztrátám, a tedy i vysoké spotřebě tohoto skleníkového plynu. [3, 12]

2.6 Další faktory

Dalšími faktory, které mají vliv na růst rostlin a které je možné určitým způsobem řídit je například kyselost půdy, respektive pěstebního média, nebo složení živin v něm obsažených.

Pěstování rostlin negativně ovlivňuje extrémní počasí, škůdci anebo choroby. Uzavřené prostory pro pěstování nabízí rostlinám alespoň částečnou ochranu před těmito faktory.

Rostlina	Teplota	Relativní vlhkost vzduchu	Rozdíl tlaku vodních par
Salát	25 °C (den), 22 °C (noc)	60-70%	0,85-0,95 kPa
Rajčata	25 °C - 31 °C	75-85% (VF), 65-75% (FK)	0,65-0,8 kPa (VF), 0,85-1,0 kPa (FK)
Bylinky	20 °C (den), 15 °C (noc)	70-80%	0,6 (den), 0,45 kPa (noc)
Microgreens	21 °C (den), 17 °C (noc)	80%	0,5 kPa (den), 0,39 kPa (noc)
Houževnatec jedlý	12,8 °C - 24 °C	80%	0,6-0,8 kPa
Konopí	22 °C - 24 °C	65-75% (VF), 60-70% (FK)	0,8-0,95 kPa (VF), 1,0-1,15 kPa (FK)
Okurky	21 °C - 25 °C (den), 20 °C (noc)	75-80%	0,65 kPa (den), 0,45 kPa (noc)
Papriky	21 °C (den), 17 °C (noc)	55-65%	1,0 (den), 0,75 kPa (noc)
Jahody	30 °C (den), 15 °C (noc)	65% (den), 100% (noc)	1,0 kPa (den), 0,0 kPa (noc)
Borůvky	v průměru 23 °C	90%	0,28 kPa
Rýže	23 °C - 27 °C	70%	1,05 kPa (den), 0,85 kPa (noc)

Rostlina	Intenzita světla	Délka dne	Koncentrace CO2	Doba pěstování
Salát	200 PPF	16 h	800-1200 ppm	30 dnů
Rajčata	600 PPF	12 h	1000 ppm	90 dnů
Bylinky	67% 620 nm, 33% 450 nm	12 h	800-1200 ppm	50-90 dnů
Microgreens	85% červ., 15% modré, 300-600 PPF	16 h	500-800 ppm	7-21 dnů
Houževnatec jedlý	55-100 PPF	12 h	800 ppm	50-60 dnů
Konopí	400 - 600 PPF	18 h (VF), 12 h (FK)	800-1100 ppm	70-80 dnů
Okurky	85% červ., 15% modré, 100-250 PPF	16 h	450-600 ppm	55-65 dnů
Papriky	430-500 PPF	14 h	450-500 ppm	50-65 dnů
Jahody	300 PPF (červené)	16 h	1000 ppm	90 dnů
Borůvky	100-200 PPF	16 h	1500 ppm	30-40 dnů
Rýže	800 PPF	12 h	400 ppm	100 dnů

Tabulka 2.1. Ideální podmínky pro pěstování vybraných rostlin a houby houževnatec jedlého. Tabulka je převzata a přeložena z [11].

Kapitola 3

Komerční řešení

3.1 Plantee

Plantee je chytrý skleník od českého startupu Plantee Innovations. V září roku 2021 startup představil první verzi skleníku na portálu Kickstarter, který slouží pro crowdfundingové financování projektů. Projekt zde v krátké době více než čtyřikrát překonal svou cílovou částku 25 000 amerických dolarů, když získal 101 828 USD (téměř 2,2 miliony korun českých) pro vývoj a výrobu prvních kusů. I přes počáteční úspěch se však pouhý měsíc po představení tvůrci rozhodli pro zrušení této kampaně s odůvodněním, že nedokáží naplnit časový plán doručení skleníku zákazníkům a splnit předem oznámenou cenu skleníku. Za dvě hlavní příčiny uvedli nedostatek elektronických polovodičových součástek na trhu a výrazné zvýšení ceny hliníku během pandemie covidu-19. [13]

Fotografie první verze skleníku Plantee je na obrázku 3.1. Byla vybavena LED modulem pro simulaci optimálního cyklu dne a noci a systémem pro automatické zavlažování. Na stránkách projektu je uvedeno, že se ve skleníku nacházel senzor vlhkosti vzduchu a systém pro vytápění a cirkulaci vzduchu. Skleník s největší pravděpodobností nebyl vybaven odvlhčovačem a snižování vlhkosti vzduchu mělo probíhat pouze větráním. Skleník dále disponoval dotykovým LCD panelem pro interakci s uživatelem a průhledným krytem, který umožňoval udržení požadovaných podmínek v okolí pěstované rostliny. [13]



Obrázek 3.1. První verze skleníku Plantee s rajčaty. [14]



Obrázek 3.2. Nová verze skleníku Plantee. [15]

V první polovině roku 2023 byly spuštěny webové stránky projektu Plantee, které představují novou verzi chytrého skleníku. Tato verze je znázorněna na obrázku 3.2. Z obrázků na webových stránkách je zřejmé, že nová verze již není vybavena krytem, který by odděloval okolí od prostředí, ve kterém roste rostlina. Dále se liší systém ohřívání, jehož součástí jsou nyní dva infračervené panely, které ohřívají pěstovanou rostlinu ze strany, a také vyhřívač půdy. Mezi funkcemi skleníku je uvedeno zvlhčování vzduchu. Více informací týkajících se vlhkosti vzduchu není uvedeno. [15]

3.2 Binder

Společnost Binder se zabývá vývojem a výrobou komor simulujících určitá prostředí. Jedním z produktů, které firma nabízí jsou i růstové komory. Tyto komory dokáží simulovat přirozené prostředí pro růst rostlin, ale i jiných organismů. Firma nabízí dvě produktové řady těchto komor, které nesou označení KBW a KBWF, a které se dále dělí podle velikosti. Oba produkty umožňují přesné řízení teploty uvnitř komory a poskytují homogenní osvětlení využívající zářivky. Řada KBWF se od KBW liší tím, že disponuje i systémem pro řízení vlhkosti vzduchu. [16]



Obrázek 3.3. Pohled dovnitř růstové komory KBWF 240. [16]



Obrázek 3.4. Růstová komora KBW 720. [16]

V tabulce 3.1 jsou uvedeny všechny růstové komory, které společnost Binder nabízí. U všech komor jsou udávány rozpětí vnitřní teploty od 0 °C do 70 °C a v případě řady KBWF rozsah relativní vlhkosti vzduchu uvnitř komory od 10% do 80%. Společnost nikde na svých webových stránkách nebo v katalogovém listu neuvádí, jaký systém používá pro snižování hodnoty relativní vlhkosti vzduchu, pouze zmiňuje využití kapacitních senzorů vlhkosti a ke zvýšení vlhkosti využívá parní zvlhčovač vzduchu. [16–17]

Produkt	Vnitřní objem (L)	Příkon (kW)	Cena (EUR)	Cena (CZK)
KBW 240	247	1,4	15 060	350 000
KBW 400	400	1,6	16 637	390 000
KBW 720	698	2,7	23 235	545 000
KBWF 240	247	2,4	22 948	540 000
KBWF 720	700	3,5	27 541	645 000

Tabulka 3.1. Porovnání růstových komor společnosti Binder. [17]

Pomocí údajů v tabulce 3.1 můžeme porovnat základní rozdíly mezi variantou růstové komory bez odvlhčovače a s ním. Doporučená cena výrobce udávaná v eurech je v posledním sloupci tabulky přepočítána na české koruny. V případě řady 240, které odpovídá vnitřní objem komory 247 litrů, je varianta KBWF přibližně o 52% (7 888 EUR) dražší než KBW. Udávaný příkon je u této varianty s odvlhčovačem o 71% vyšší. Cena komory KBWF 720 je oproti KBW 720 vyšší o 19% (4 306 EUR) a příkon se v tomto případě zvýší o 30%.

3.3 Freight Farms

Cílem společnosti Freight Farms je decentralizace zemědělství za využití přepravních kontejnerů, které poskytují určitou standardizaci a modularitu, předělaných na vertikální farmy. Tyto farmy jsou založeny na technologii hydroponie, tedy pěstování rostlin bez pevného substrátu, kdy jsou všechny potřebné živiny rozpuštěny ve vodě a přímo doručeny ke kořenům rostlin. [18]



Obrázek 3.5. Farma Greenery S v teplém prostředí. [18]

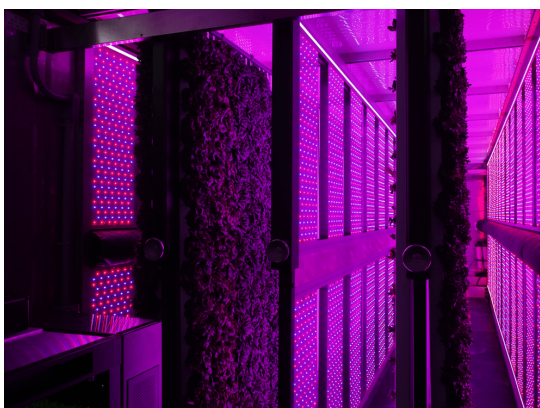


Obrázek 3.6. Farma Greenery S v chladném prostředí. [18]

Společnost nabízí produkt Greenery S, což je vertikální farma v přepravním kontejneru o rozměrech 40' x 8' x 9.5' (přibližně 12,2 m x 2,4 m x 2,9 mm). Firma na svých webových stránkách uvádí, že tato farma může fungovat nepřetržitě celý rok při vnějších teplotách od -40 °C do 50 °C. Průměrná denní spotřeba se pohybuje od 168 kWh do 231 kWh elektrické energie a zhruba 5 galonů (přibližně 19 litrů) vody. Za rok dokáže tato farma vyprodukovat 2 až 8 tun zemědělských plodin, což odpovídá přibližně 2 až 4 akrům (neboli 8 až 16 tisíc m²) zemědělské půdy při tradičním způsobu pěstování. Cena jedné farmy Greenery S je 149 000 USD, tedy přibližně 3,16 milionů Kč. [18]



Obrázek 3.7. Pohled dovnitř farmy Greenery S. [18]



Obrázek 3.8. Osvětlení uvnitř farmy Greenery S. [18]

Kontejnerová farma Greenery S je vybavena izolací, která chrání vnitřní prostor a pěstované rostliny před vnějšími vlivy počasí a umožňuje precizní řízení vnitřní teploty. Na obrázcích 3.5 a 3.6 jsou fotografie farem Greenery S v různých prostředích s rozdílnou teplotou okolního vzduchu. O zajištění správného množství světla se starají LED panely,

kteří dokáží poskytnout osvětlení v celé šířce viditelného spektra nebo případně jen modré a červené světlo, které je pro rostliny nejdůležitější. Na obrázcích 3.7 a 3.8 jsou znázorněny různé úrovně osvětlení uvnitř farmy Greenery S. Ventilační a klimatizační systém, který se stará o regulaci teploty se skládá i z odvlhčovače vzduchu a také umožňuje regulaci koncentrace CO₂. [18]

3.4 Laboratory Biosphere

Laboratory Biosphere je hermeticky uzavřená experimentální komora o objemu přibližně 40 m³. Byla postavena za účelem provádění nejrůznějších experimentů, které mají za cíl prohloubit naše znalosti o biosféře. Konkrétně byla navržena pro výzkum udržitelných zemědělských systémů využívajících pevné substráty a výzkum biogeochemického cyklu některých prvků, zejména uhlíku, dusíku nebo fosforu. Dalším hlavním důvodem, proč byla Laboratory Biosphere postavena, je výzkum odrůd zemědělských plodin a vliv světla a dalších faktorů prostředí na růst rostlin. Na obrázku 3.9 je fotografie Laboratory Biosphere. [19–20]

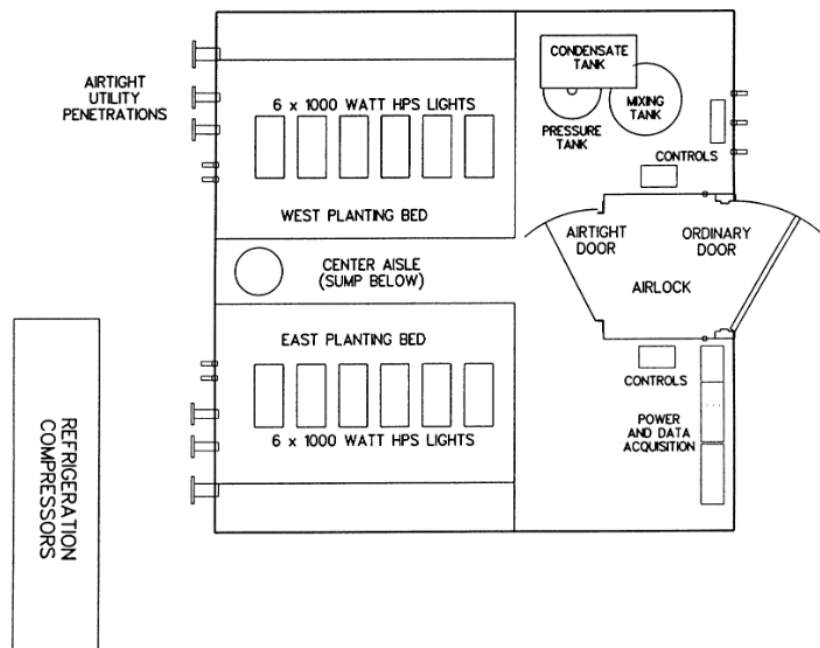


Obrázek 3.9. Uzavřená komora Laboratory Biosphere. [20]

Laboratory Biosphere sestává z hlavní komory a tzv. plíce. Plíce je v podstatě plastový pytel, který slouží k udržení stálého tlaku uvnitř komory, čímž zlepšuje vzduchotěsnost komory. Vzduch uvnitř komory se rozpíná, například v důsledku zvýšení teploty, a přebytečný objem tak může unikat do této plíce. Naopak, při snížení teploty v komoře se plíce smršťuje a vzduch se vrací zpět. Maximální možný objem plíce je 9 m³. [19]

Na obrázku 3.10 je znázorněn půdorys Laboratory Biosphere. V pravé části se nachází přechodová komora, díky které je omezena výměna vzduchu mezi hlavní komorou a vnějším prostředím při vstupu osob. Vnější dveře přechodové komory jsou běžného typu a vnitřní dveře jsou speciální vzduchotěsné. Jedna obousměrná cesta do komory a zpět ven s využitím přechodové komory způsobí výměnu přibližně 2% objemu veškerého vzduchu uvnitř komory s venkovním vzduchem. Dále se uvnitř komory nachází

dva záhony pro rostliny o celkové ploše 5,37 m². Nad každým záhonem je umístěno 6 vysokotlakých sodíkových výbojek, které pěstovaným rostlinám poskytují světlo. [19]



Obrázek 3.10. Půdorys Laboratory Biosphere. [19]

O řízení teploty a relativní vlhkosti vzduchu uvnitř objektu se starají kompresorové jednotky. Vzduch je v těchto jednotkách nejprve zbaven požadovaného množství vody, během čehož je zároveň ochlazen. Následně je tento vzduch ohříván na zadanou teplotu. Neustálé zvyšování relativní vlhkosti vzduchu způsobuje evapotranspirace, tedy vypařování vody z půdy a listů rostlin. Kondenzát, tedy voda extrahovaná ze vzduchu při procesu odvlhčování, je sveden do kondenzační nádrže. Voda, která proteče substrátem po zalití rostlin stéká do jímky. Dále se v komoře nachází směšovací nádrž, ve které dochází ke smíchání čistého kondenzátu s vodou z jímky, která obsahuje větší množství pevných částic ze substrátu. Voda ze směšovací nádrže je následně čerpána do tlakové nádoby, která je přímo napojena na zavlažovací systém. [19]

Vzhledem k benefitům, které nabízí zvýšená koncentrace CO₂ pro pěstování rostlin je Laboratory Biosphere vybavena i systémem, který dokáže tuto koncentraci zvyšovat. Oxid uhličitý může být do vnitřní atmosféry připouštěn z externích nádrží. [19]

Kapitola 4

Autonomní pěstební jednotka

Cílem práce je návrh a implementace autonomního systému, který umožní pěstování rostlin bez potřeby obsluhy. Systém se bude skládat z uzavřeného skleníku, který bude navržen tak, aby docházelo k co možná nejmenší výměně vzduchu mezi skleníkem a okolím. Vzhledem k evapotraspiraci uvnitř skleníku bude jeho součástí odvlhčovač, který bude odebírat vodu obsaženou ve vzduchu tak, aby mohla být opětovně použita k automatizovanému zavlažování. Pěstební jednotka bude určena pro použití v místnostech přibližně o pokojové teplotě, která vyhovuje většině uvažovaných rostlin, proto nebude řešeno vyhřívání nebo chlazení vzduchu uvnitř skleníku. Jako doplnění denního světla v případě jeho nedostatku nebo úplné absenci bude součástí skleníku i řízené osvětlení. Návrh jednotlivých subsystémů je popsán kapitole 5 a jejich softwarové řešení v kapitole 6. Výsledky testování celého systému nebo jeho částí jsou prezentovány v kapitole 7 a jejich diskuze se nachází v kapitole 8.

Kapitola 5

Hardware

5.1 Použité senzory

5.1.1 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu DHT22

K výpočtu rozdílu tlaku vodních par uvnitř skleníku potřebujeme znát hodnoty teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Obě tyto veličiny dokáže měřit běžně dostupný digitální teploměr a vlhkoměr DHT22, který obsahuje kapacitní senzor vlhkosti a termistor. Kapacitní senzor vlhkosti se skládá ze dvou elektrod, mezi nimiž se nachází dielektrikum, které mění své vlastnosti na základě relativní vlhkosti vzduchu, ve kterém se nachází. Kapacita senzoru se tak mění s měnící se relativní vlhkostí vzduchu. Termistor je odporový senzor, což znamená, že s měnící se teplotou se mění jeho odpor. [21]

Napájecí napětí senzoru je 5 V. Výrobce udává tyto parametry senzoru:

- Rozsah měření teploty: -40 až +80 °C
- Přesnost měření teploty: $\pm 0,5$ °C
- Rozlišení měření teploty: 0,1 °C
- Rozsah měření relativní vlhkosti: 0 až 100 %
- Přesnost měření relativní vlhkosti: ± 2 %
- Rozlišení měření relativní vlhkosti: 0,1 %

5.1.2 Senzor vlhkosti půdy

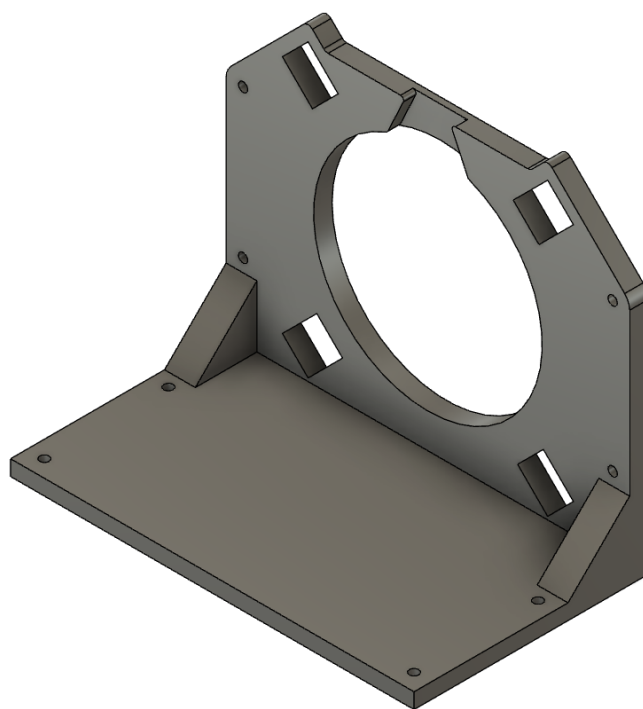
Pro účely automatického zavlažování potřebujeme znát aktuální množství vody obsažené v půdě. Pro měření vlhkosti půdy jsme zvolili Půdní analogový vlhkoměr s antikorozní sondou. Výstupní napětí senzoru je nepřímo úměrné množství vody v půdě, respektive dielektriku senzoru. Na rozdíl od relativní vlhkosti vzduchu, která je udávána v procentech, není v případě vlhkosti půdy běžně používána žádná konkrétní jednotka. Hodnotu vlhkosti, kterou senzor změří můžeme vztahovat k hodnotám vlhkosti, které tento senzor naměří v případě, kdy je na suchu a v případě, kdy je sonda senzoru úplně ponořená ve vodě. Napájecí napětí senzoru je 5 V.

5.2 Skleník

Při výběru vhodného skleníku byly naším hlavním kritériem jeho rozměry. Požadovali jsme, aby v něm bylo možné pěstovat několik rostlin menších rozměrů, například ředkviček nebo salátu. Zároveň bylo naším požadavkem, aby se skleník bez problémů vešel do místností jako je školní laboratoř nebo pokoj v bytě a nepřekážel v nich. Dále jsme chtěli, aby se dalo se skleníkem pokud možno co nejjednodušeji manipulovat a také aby byl průhledný. Nejvíce našim požadavkům vyhovoval plastový úložný box KIS T-Box vel. XXL o rozměrech 580 mm x 435 mm x 795 mm (šířka x výška x hloubka) s víkem.

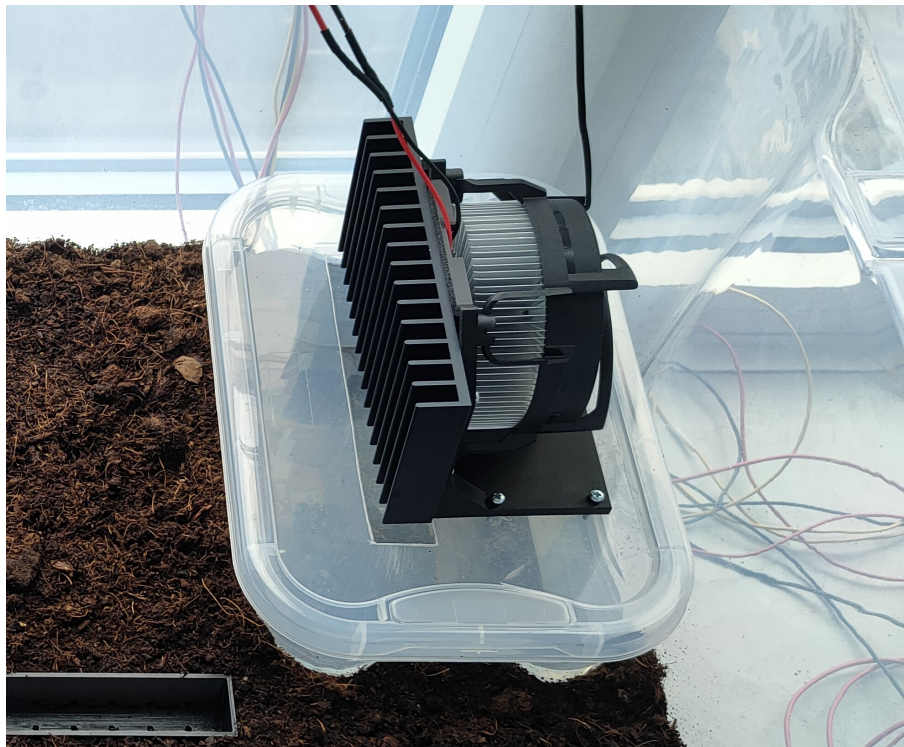
5.3 Odvlhčovač

Vzhledem k jednoduchosti, ceně i fyzickým rozměrům odvlhčovače jsme se rozhodli pro náš skleník zkonstruovat odvlhčovač využívající Peltierův článek. Odvlhčovač se skládá z Peltierova článku TEC1-127080S, chladiče studené strany článku EZK CHL20B/80 BLK, chladiče teplé strany článku s větrákem ARCTIC Alpine 17 a držáku, ke kterému jsou připevněny zmíněné tři komponenty. Držák jsme namodelovali pomocí programu Autodesk Fusion 360 a následně vytiskli na 3D tiskárně z materiálu PETG. Model držáku je znázorněn na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1. 3D model držáku pro odvlhčovač

Hliníkový chladič s větrákem pro horkou stranu Peltierova článku je zasazen do držáku z přední strany, která je vidět na obrázku 5.1. Z druhé strany je pomocí šroubů k držáku připevněn chladič studené strany. V kruhovém otvoru držáku, mezi oběma chladiči, se nachází Peltierův článek. Na jeho obě strany jsme před instalací chladičů nanесли teplovodivou pastu. Hotový odvlhčovač je pomocí šroubů připevněn k víku nádrže na vodu, která se nachází uvnitř skleníku. Voda po kondenzaci na studeném chladiči stéká přímo do této nádrže skrz otvor v jejím víku. Fotografie hotového odvlhčovače umístěného ve skleníku je na obrázku 5.2. Napájecí napětí použitého Peltierova článku a větráku chladiče je 12 V. Udávaný maximální proud protékající článkem při maximálním doporučeném napětí 16,4 V je 8,4 A. Větrákem protéká proud 120 mA.



Obrázek 5.2. Sestavený odvlhčovač

5.4 Osvětlení

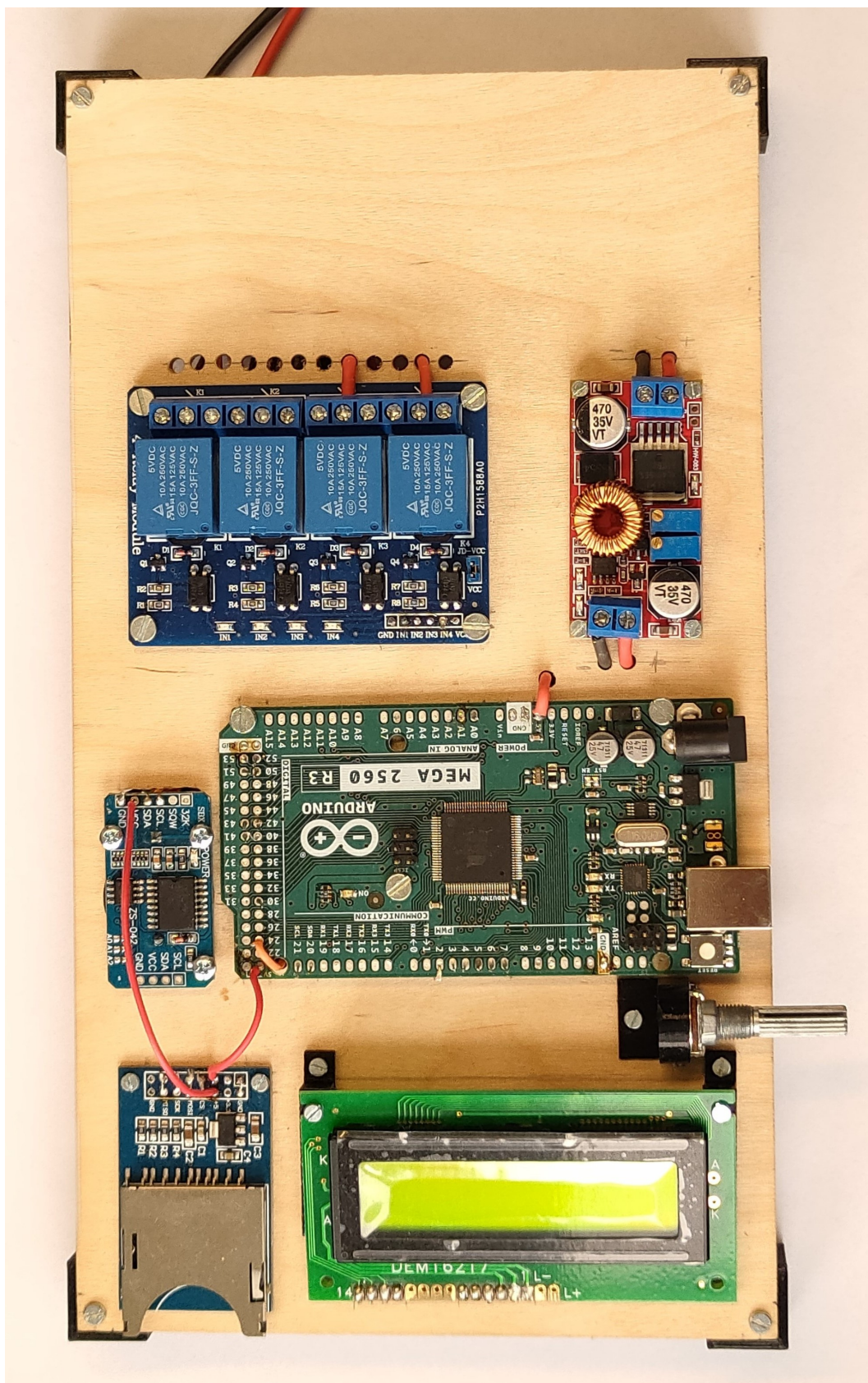
Pro osvětlení uvnitř skleníku jsme využili šest LED modulů, z nichž každý je osazen osmi adresovatelnými RGB LED diodami NeoPixel WS2812. Všechny diody jsou ovládané pomocí jednoho výstupu mikrokontroléru. U každé z diod lze podle požadavků pěstovaných rostlin, respektive uživatele skleníku nastavit požadovaný jas a barvu. Napájecí napětí LED diod je 5 V a maximální odebíraný proud jednou diodou je 50 mA. Moduly jsme připevnili ke spodní straně víka skleníku.

5.5 Zavlažování

Pro účely automatického zavlažování jsme využili malé ponorné čerpadlo umístěné uvnitř nádrže na vodu. Nádrž je částečně zanořena do substrátu v rohu skleníku a jde o plastový box KIS T-Box vel. XXS o objemu 5 litrů. Systém je navržen tak, že čerpadlo tlačí vodu do koryta tvaru kříže, nacházejícího se na povrchu substrátu, respektive je do něj částečně zanořené. Voda se pak do půdy dostává malými otvory ve spodní části koryta. Čerpadlo využívá napětí 5 V a prochází jím proud maximálně 220 mA.

5.6 Řídící jednotka

Řídící jednotka se skládá z jednodeskového počítače Arduino MEGA 2560 a několika modulů, které jsou přišroubovány k tenké dřevěné desce. Fotografie této jednotky je na obrázku 5.3. Kabely z Arduino a modulů jsou, až na výjimky, vyvedeny vyvrtanými otvory pod dřevěnou desku, kde jsou propojeny. Kabely, které spojují řídicí jednotku se zařízeními uvnitř skleníku nejsou na fotografii zapojeny.



Obrázek 5.3. Řídicí jednotka

5.6.1 Arduino MEGA 2560

Deska Arduino MEGA 2560 Rev3 je založena na mikrokontroléru ATmega2560 a poskytuje 54 vstupně výstupních pinů a 16 analogových vstupů. Mikrokontrolér získává a zpracovává data z použitých senzorů a řídí či jinak využívá použité periferie. Arduino je napájeno 12 V.

5.6.2 Relé

Zapínání a vypínání Peltierova článku, větráku a čerpadla je řízeno pomocí relé. Zvolili jsme modul se čtyřmi elektromagnetickými relé JQC-3FF-S-Z s optickým oddělením ovládní. Relé jsou typu Low Trigger, což znamená, že k sepnutí dojde uzemněním příslušného pinu. Piny IN1-4 sloužící ke spínání jednotlivých relé jsou připojeny k pinům D40-43 na desce Arduino. Pracovní napětí relé modulu je 5 V.

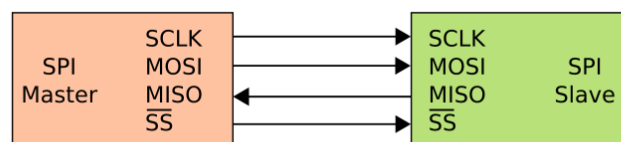
5.6.3 LCD displej

Na LCD displeji, který je součástí řídicí jednotky, jsou vypisovány základní informace o prostředí uvnitř skleníku a stavu systému. Používáme LCD modul DEM 16217 SYH. Jde o dvouřádkový displej, přičemž na každý řádek se vejde 16 znaků. Pro účely naší práce využíváme deset z šestnácti pinů, které modul poskytuje. K pinu VSS je připojena zem a na VDD je připojeno napájecí napětí 5 V. K pinu V0 je připojen výstup 10 k Ω potenciometru, pomocí kterého lze měnit kontrast displeje. Pin RS, neboli Register select je připojen k pinu D6 Arduina a pin R/W je připojen k zemi, modul je tedy neustále v režimu zápisu hodnot. Pin Enable je připojen k pinu D7 Arduina a čtyři datové piny DB4-7 jsou připojeny k pinům D2-5 Arduina.

5.6.4 Čtečka SD karty

K načtení profilu rostliny, respektive požadovaných parametrů prostředí uvnitř skleníku slouží modul se čtečkou SD karty. Ten také dále slouží k ukládání naměřených dat, jako jsou například teplota a relativní vlhkost vzduchu uvnitř skleníku.

Modul komunikuje s Arduinem pomocí rozhraní SPI. Schéma tohoto komunikačního rozhraní je znázorněno na obrázku 5.4, speciálně pro náš případ, kdy modul čtečky je jediným zařízením typu slave využívajícím tuto sběrnici. Arduino MEGA 2560 má pro komunikaci po sběrnici SPI vyhrazené piny D50 (MISO), D51 (MOSI), D52 (SCLK), D53 (SS).



Obrázek 5.4. Schéma sběrnice SPI s jedním zařízením typu master a jedním zařízením typu slave. [22]

5.6.5 Hodiny reálného času

K určení času využíváme RTC modul s čipem DS3231 s integrovaným teplotně kompenzovaným krystalovým oscilátorem (TCXO) a krystalem. Znalost přesného času je důležitá pro řízení osvětlení, které chceme vypínat a zapínat v předem daný čas, a také při ukládání naměřených dat, kterým je přiřazena časová značka.

Modul komunikuje s Arduinem pomocí sběrnice I2C. Ta využívá pouze dva vodiče, a to jeden pro hodinový signál a druhý pro přenos dat. Adresa hodin reálného času je 0x68. Arduino MEGA má pro komunikaci po sběrnici I2C vyhrazené piny D20 (SDA) a D21 (SCL). Modul je napájen napětím 5 V.

5.7 Napájení

5.7.1 Zdroj 12 V

Pro napájení odvlhčovače a desky Arduino MEGA 2560 využíváme spínaný zdroj MEAN WELL RS-150-12. Zdroj je připojen k síti o střídavém napětí 230 V a frekvenci 50 Hz. Výstupní stejnosměrné napětí je 12 V a zdroj dokáže poskytnout maximální proud 12,5 A.

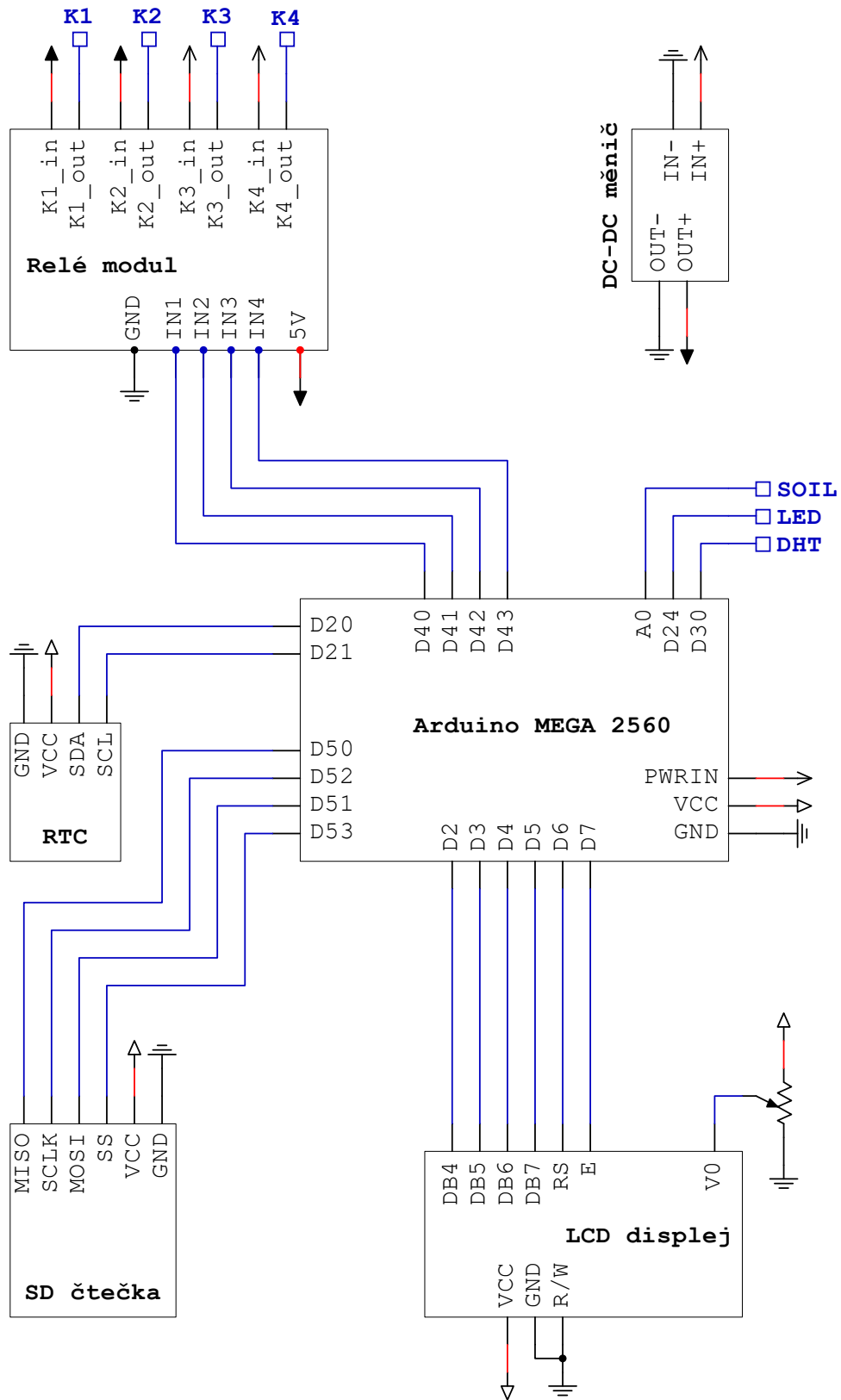
5.7.2 Zdroj 5 V

Kromě zmíněných zařízení pracuje většina elektroniky, která je součástí řídicí jednotky nebo se nachází uvnitř skleníku se stejnosměrným napětím 5 V. Moduly a senzory, které pro svou funkci potřebují pouze velmi malý proud jsou napájeny přímo z desky Arduino. Arduino MEGA 2560 využívá jako zdroj 5 V lineární regulátor LD1117, který dokáže poskytnout maximální proud 800 mA.

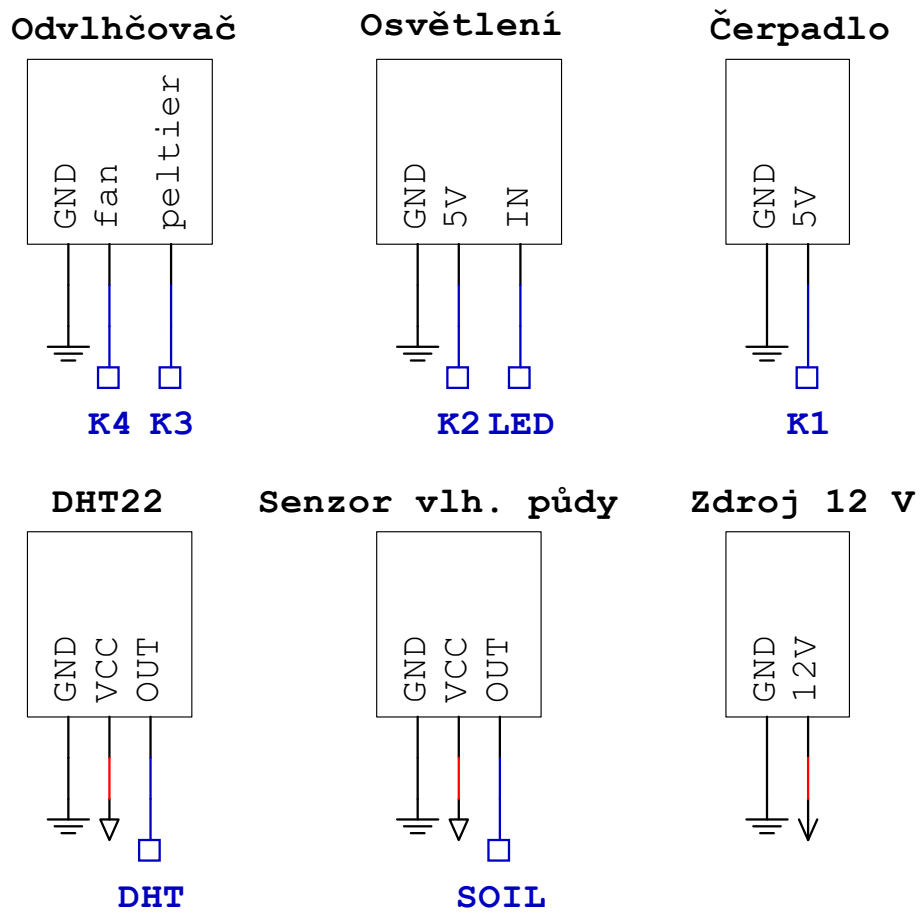
Součástí řídicí jednotky je i modul se stejnosměrným měničem XL4015, který je také zdrojem 5 V. Tento měnič je využit jako zdroj napětí pro LED diody, které jsou součástí osvětlení uvnitř skleníku, pro ponorné čerpadlo a také ke spínání relé. Vstupní napětí měniče je 12 V a maximální výstupní proud je 5 A.

5.8 Schéma zapojení

Na obrázku 5.5 je znázorněno schéma řídicí jednotky a na obrázku 5.6 jsou uvedeny všechny k ní připojené periferie.



Obrázek 5.5. Zjednodušené schéma zapojení řídicí jednotky



Obrázek 5.6. Zjednodušené schéma zapojení periférií

Kapitola 6

Software

Software pro řídicí jednotku je napsán v programovacím jazyce pro Arduino, který je založen na jazyce C++. Při implementaci programu jsme využili několik následujících volně dostupných knihoven.

- *DHT* pro práci se senzorem teploty a vlhkosti vzduchu DHT22
- *Adafruit_NeoPixel* pro práci s LED diodami NeoPixel WS2812
- *LiquidCrystal* pro práci s použitým LCD displejem
- *SD* pro práci s SD kartou
- *SPI* pro použití sběrnice SPI, kterou využívá modul čtečky SD karty
- *DS3231* pro práci s hodinami reálného času
- *Wire* umožňující využití sběrnice I2C

6.1 Struktura programu

Program pro Arduino se skládá ze dvou hlavních částí: setup a loop, neboli hlavní smyčky. V části setup dochází k inicializaci periférií a jednotlivých modulů řídicí jednotky. Dále v případě, že je přítomna SD karta, je načten soubor obsahující požadovanou úroveň osvětlení uvnitř skleníku, časy simulovaného východu a západu slunce a hraniční hodnoty, mezi kterými se může pohybovat relativní vlhkost vzduchu uvnitř skleníku. Pokud není SD karta do čtečky vložena, je použito předem definované výchozí nastavení.

Na obrázku 6.1 je znázorněno blokové schéma hlavní smyčky. Jednotlivé bloky schématu jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Blokové schéma neobsahuje sekci o zavlažování, protože nebylo v poslední verzi implementováno. Důvody jsou popsány v kapitolách 7 a 8.

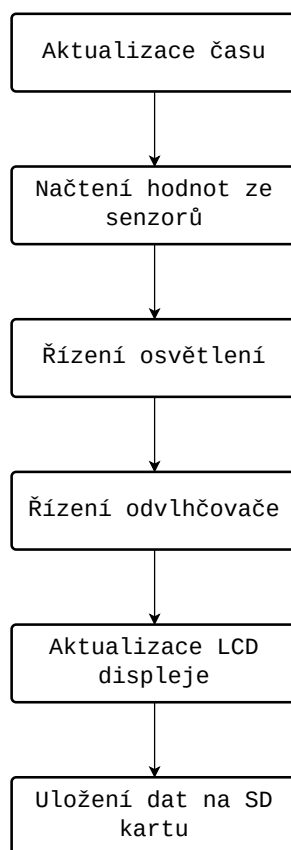
6.1.1 Aktualizace času a načtení hodnot ze senzorů

Nejprve dojde pomocí funkce *getDateTime()* z knihovny *DS3231* k uložení aktuálního času do struktury, která obsahuje několik položek. Pro řízení osvětlení a zobrazení na LCD displeji využíváme položky *hour* a *minute*, které reprezentují aktuální hodinu a minutu. Ostatní údaje o čase jsou zapsány na SD kartu, pokud je využita.

Následně jsou do příslušných proměnných načteny hodnoty teploty a relativní vlhkosti vzduchu uvnitř skleníku pomocí funkcí *readTemperature()* a *readHumidity()* z knihovny *DHT*. Pomocí funkce *analogRead()* je také načtena hodnota ze senzoru vlhkosti půdy.

6.1.2 Řízení osvětlení

Blokové schéma řízení osvětlení je znázorněno na obrázku 6.2. Implementovali jsme funkci *isDay()*, pomocí které zjistíme, zda má být v daný čas zapnuté osvětlení. Funkce porovnává aktuální čas, konkrétně hodiny a minuty, které jsme načtli v úvodní části

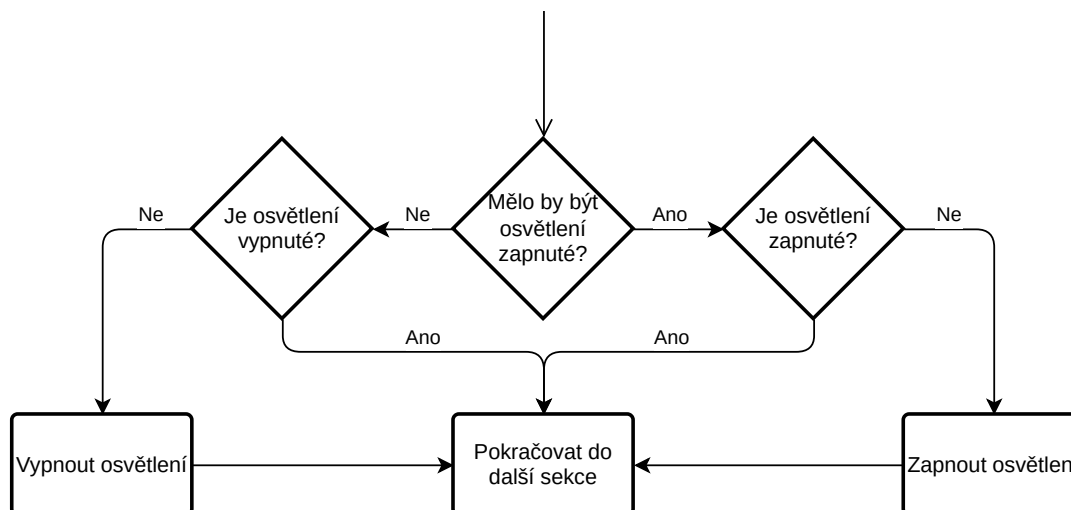


Obrázek 6.1. Blokové schéma hlavní smyčky programu

smyčky, s časem požadovaného simulovaného východu a západu slunce. Pokud se aktuálně nacházíme v čase po východu slunce a zároveň před jeho západem, mělo by být osvětlení zapnuté. Pokud je aktuální čas po západu slunce a před jeho východem, pak simulujeme noc a osvětlení je vypnuté. Vypnutí osvětlení je uskutečněno zavoláním funkce *fill()*, jejímž argumentem je návratová hodnota funkce *Color(0,0,0)*. I v případě, kdy je osvětlení softwarově vypnuté, prochází LED moduly velmi malý proud. Z toho důvodu ještě při vypnutí osvětlení rozepínáme příslušné relé. Rozepnutí relé docílíme přivedením napětí 5V na pin IN2 relé modulu pomocí funkce *digitalWrite()*. V případě zapnutí osvětlení uzemněním pinu IN2 relé modulu sepneme příslušné relé a zavoláme funkci *fill()*, jejímž argumentem je návratová hodnota funkce funkce *Color()*, kterou voláme s argumenty specifikovanými v inicializačním souboru na SD kartě. Použité funkce jsou součástí knihovny *Adafruit_NeoPixel*.

■ 6.1.3 Řízení odvlhčovače

Řízení odvlhčovače funguje na stejném principu, který je vyobrazen v blokovém schématu řízení osvětlení na obrázku 6.2. Pokud je hodnota relativní vlhkosti ve skleníku větší nebo rovna horní hranici uvedené v inicializačním souboru a zároveň je odvlhčovač vypnutý, pak dojde k jeho zapnutí. To je uskutečněno uzemněním příslušných pinů relé modulu, tedy IN3 a IN4 pomocí funkce *digitalWrite()*. V případě, že je odvlhčovač zapnutý a hodnota relativní vlhkosti vzduchu dosáhne nebo klesne pod dolní hranici

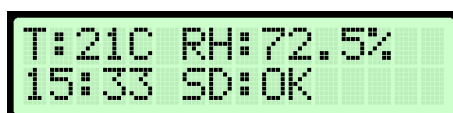


Obrázek 6.2. Blokové schéma řízení osvětlení

uvedenou v souboru na SD kartě, pak je pomocí funkce *digitalWrite()* na piny IN3 a IN4 přivedeno napětí 5 V, čímž dojde k odpojení relé.

6.1.4 Aktualizace LCD displeje

Na prvním řádku displeje je zobrazena aktuální teplota uvnitř skleníku a relativní vlhkost vzduchu uvnitř skleníku. Na druhém řádku je aktuální čas a informace o tom, zda je přítomna SD karta. Pokud se SD karta ve čtečce nachází, je to indikováno stavem SD:OK, v opačném případě se na displeji zobrazuje SD:NE. Ukázka výpisu těchto informací na LCD displeji je na obrázku 6.3. Při výpisu na LCD displej využíváme funkce *print()* a *setCursor()* z knihovny *LiquidCrystal*.



Obrázek 6.3. Ukázka výpisu na LCD displeji

6.1.5 Uložení dat na SD kartu

Pokud je SD karta přítomna ve čtečce, pak je při každé iteraci na jeden řádek v souboru na této kartě zapsáno několik informací o stavu systému a naměřené hodnoty ze senzorů. Každý řádek obsahuje čísla oddělená mezerou v tomto pořadí: číslo iterace od resetu, aktuální rok, měsíc, den, hodina, minuta, sekunda, teplota, relativní vlhkost vzduchu, hodnota ze senzoru vlhkosti půdy, informace o tom, zda je zapnutý odvlhčovač (1 nebo 0) a informace o tom, zda je zapnuté osvětlení (1 nebo 0). Jeden řádek v tomto výstupním souboru na SD kartě může vypadat následovně:

```
89327 2023 4 20 15 33 8 21.60 72.50 568 1 1
```

Zápis do souboru je uskutečněn pomocí funkce *print()* a otevření a zavření souboru probíhá prostřednictvím funkcí *open()* a *close()* z knihovny *SD*.

Kapitola 7

Experimentální výsledky

V této kapitole jsou popsány experimenty, při kterých jsme testovali jednotlivé subsystémy skleníku nebo kompletní systém. Dále jsou zde uvedeny výsledky těchto experimentů. Výsledky jsou diskutovány v kapitole 8, kde jsou také uvedena možná řešení zde popsaných problémů, na které jsme narazili během testování.

7.1 Vysazení rostlin a uspořádání skleníku

Během většiny z testů a měření popsaných v následujících podkapitolách byly ve skleníku vysazeny ředkvičky. Tuto rostlinu jsme zvolili z důvodu jejích malých rozměrů, relativně krátké době pěstování a dobré dostupnosti. Ve skleníku byly vysazeny celkem čtyři různé druhy ředkviček od tří různých prodejců. Ředkvičky jsou uspořádány do čtyř skupin a dohromady na povrchu substrátu tvoří tvar písmene X. V každé skupině je 6 až 7 ředkviček.

Na obrázku 7.1 je fotografie skleníku s ředkvičkami 14 dnů od jejich vysazení. V pravém horním rohu fotografie je vidět nádrž na vodu. V levém horním rohu se nachází senzor vlhkosti půdy a senzor DHT22 několik centimetrů nad ním. Mezi pravou horní a dolní skupinou ředkviček je část koryta pro zavlažování.



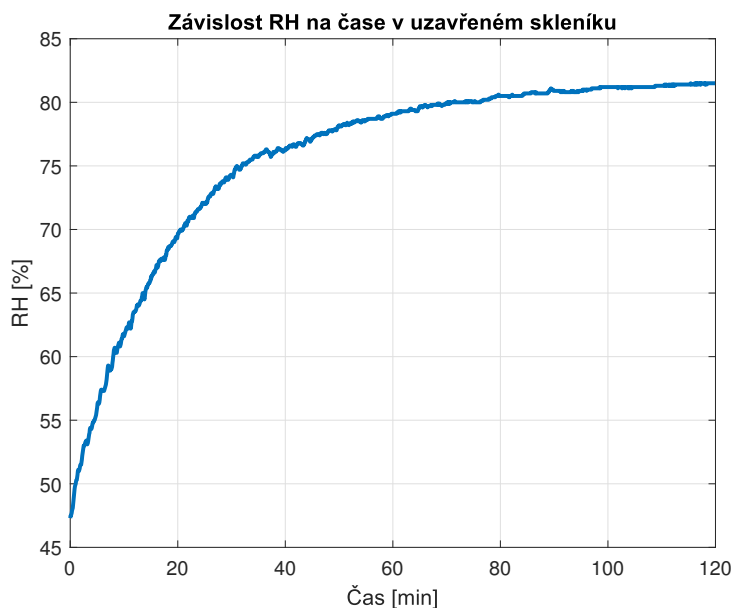
Obrázek 7.1. Ředkvičky ve skleníku 2 týdny od vysazení

7.2 Testy odvlhčovače

V následujících podkapitolách jsou popsány testy tří různých verzí použitého odvlhčovače.

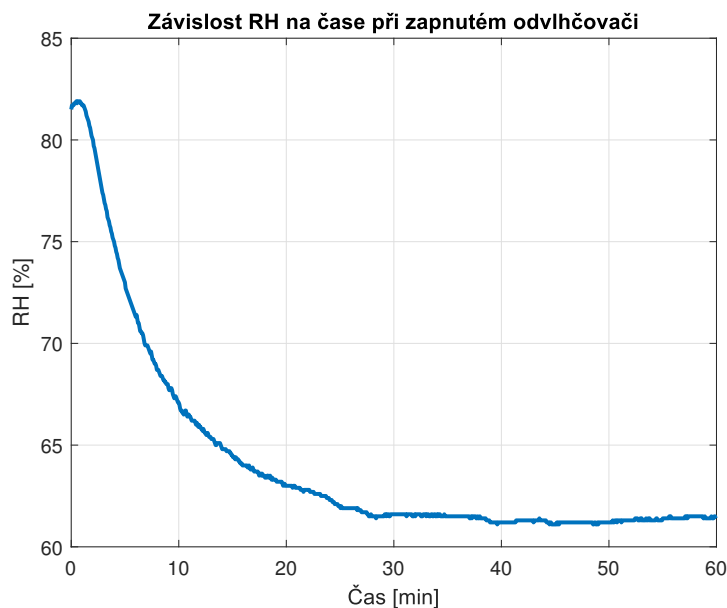
7.2.1 Odvlhčovač 1.0

Po sestavení námi navrženého odvlhčovače jsme nejprve ověřovali jeho správné fungování uvnitř uzavřeného skleníku. Nejprve jsme ve skleníku vytvořili prostředí se zvýšenou relativní vlhkostí vzduchu. Vzhledem k tomu, že se v této době ještě ve skleníku nenacházel substrát ani rostliny, docílili jsme toho tak, že jsme dovnitř skleníku umístili plastový box o rozměrech podstavy 190 mm x 260 mm a výšce 140 mm. Tento box jsme přibližně do jedné čtvrtiny výšky naplnili vodou o pokojové teplotě. Následně jsme skleník uzavřeli a zahájili sběr dat. Senzor DHT22 byl umístěn přibližně 2 centimetry nad povrchem dna skleníku a nacházel se mezi odvlhčovačem a nádobou s vodou. V okamžiku uzavření skleníku se relativní vlhkost v místnosti, a tedy i uvnitř skleníku pohybovala kolem 47%. Naměřená závislost hodnoty relativní vlhkosti vzduchu uvnitř uzavřeného skleníku na čase je znázorněna na obrázku 7.2. Měření jsme ukončili po dvou hodinách, kdy již nedocházelo ke zdatelnému zvyšování relativní vlhkosti vzduchu ve skleníku.



Obrázek 7.2. Vývoj relativní vlhkosti vzduchu v uzavřeném skleníku bez odvlhčovače

Ve chvíli, kdy se hodnota relativní vlhkosti vzduchu ve skleníku pohybovala kolem 81,5% jsme zapnuli odvlhčovač. Skleník byl po dobu odvlhčování stále uzavřen a stále se v něm nacházel zmíněný box s vodou. Naměřená závislost hodnoty relativní vlhkosti vzduchu uvnitř uzavřeného skleníku na čase v případě zapnutí odvlhčovače v čase 0 je znázorněna na obrázku 7.3. Sběr dat jsme ukončili po jedné hodině měření, kdy už nedocházelo k dalšímu snižování hodnoty relativní vlhkosti vzduchu, která v tu chvíli byla přibližně 62%.



Obrázek 7.3. Vývoj relativní vlhkosti vzduchu v uzavřeném skleníku s odvlhčovačem

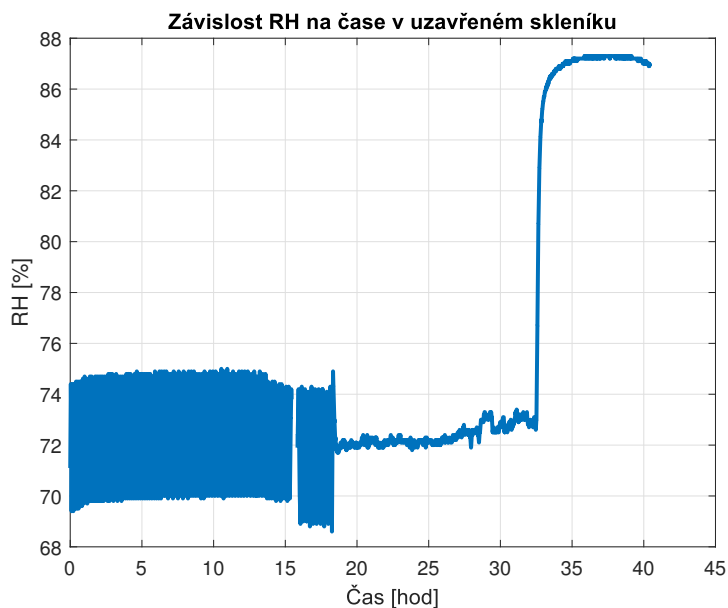
Po ověření správného chování odvlhčovače jsme dokončili ostatní subsystemy a sestavili celý skleník. Během následujících testů se ve skleníku již nacházel substrát se zasazenými ředkvičkami a testy tak odpovídaly reálnému provozu. Skleník se při těchto testech nacházel blízko okna na východní části budovy. Pokud to aktuální počasí umožnilo, tak na skleník zejména během dopoledne svítilo slunce, což mělo významný vliv na podmínky uvnitř skleníku.

Na obrázcích 7.4 a 7.5 jsou zachyceny průběhy relativní vlhkosti a teploty vzduchu uvnitř skleníku během jednoho z testů. Test byl zahájen v úterý 21. března 2023 v 17:30 SEČ a ukončen ve čtvrtek 23. března přibližně v 9:55 SEČ. Horní hranice relativní vlhkosti vzduchu, při které dojde k zapnutí odvlhčovače byla na začátku nastavena na 74% a spodní hranice na 70%.

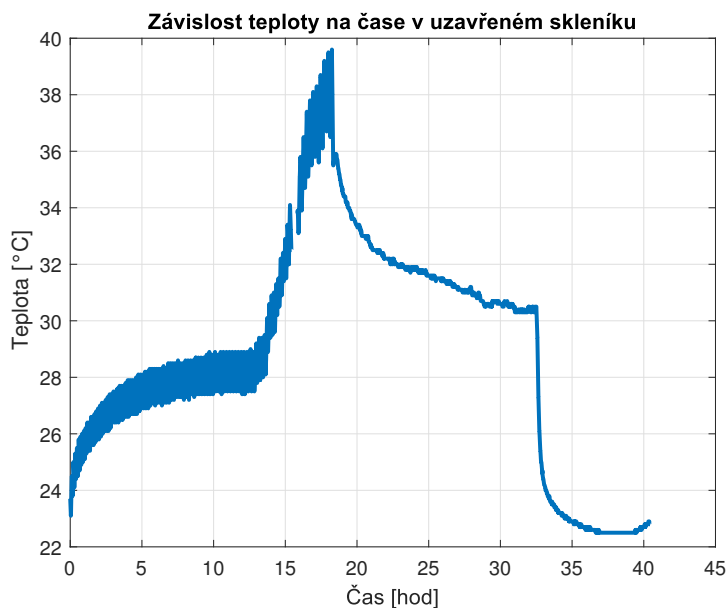
Prvních přibližně 13 hodin, tedy do 6:30 druhého dne na skleník nesvítilo slunce, jelikož byla noc a celý systém fungoval normálně. Teplota uvnitř skleníku se k ránu pohybovala mezi 27,4 °C a 28,9 °C. Toto zvýšení teploty uvnitř skleníku bylo způsobeno činností odvlhčovače, který v zapnutém stavu generoval nežádoucí teplo. Přibližně v 6:30 začalo na skleník svítit slunce, což mělo za následek další zvyšování teploty uvnitř skleníku.

Okolo 9:30 jsme přibližně na 25 minut pozastavili sběr dat kvůli úpravám v softwaru. Systém však fungoval dál bez přerušení. Následně jsme nahráli novou verzi softwaru s tím, že jsme změнили spodní hraniční hodnotu relativní vlhkosti na 69%. Systém fungoval správně dál až do 11:45, kdy teplota uvnitř skleníku dosáhla 39,6 °C. V tu chvíli došlo k částečnému poškození odvlhčovače, respektive Peltierova článku.

Odvlhčování vzduchu dále nefungovalo správně a i přes neustále zapnutý odvlhčovač nebylo dosaženo požadované spodní hranice relativní vlhkosti. 23. března ve 2:00 došlo k úplnému selhání Peltierova článku, což mělo za následek velmi rychlé zvýšení relativní vlhkosti a také snížení teploty uvnitř skleníku.



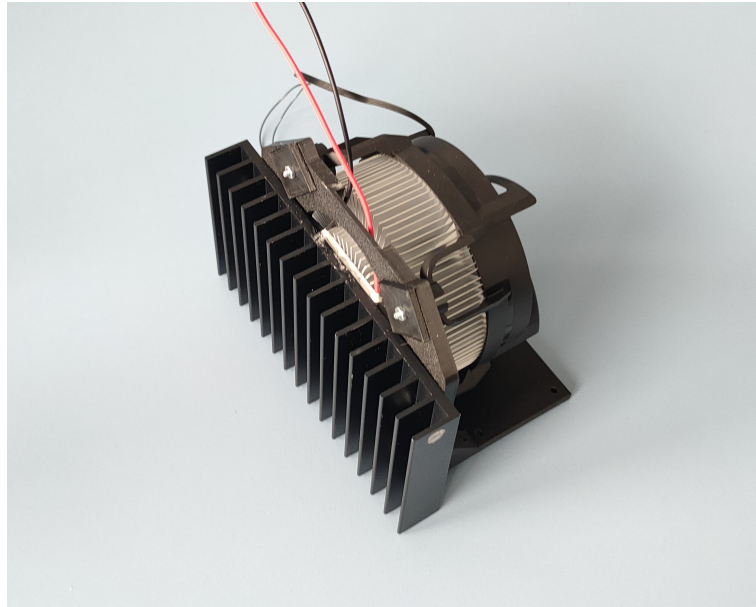
Obrázek 7.4. Test odvlhčovače 1.0 v reálných podmínkách - vývoj relativní vlhkosti vzduchu v čase



Obrázek 7.5. Test odvlhčovače 1.0 v reálných podmínkách - vývoj teploty v čase

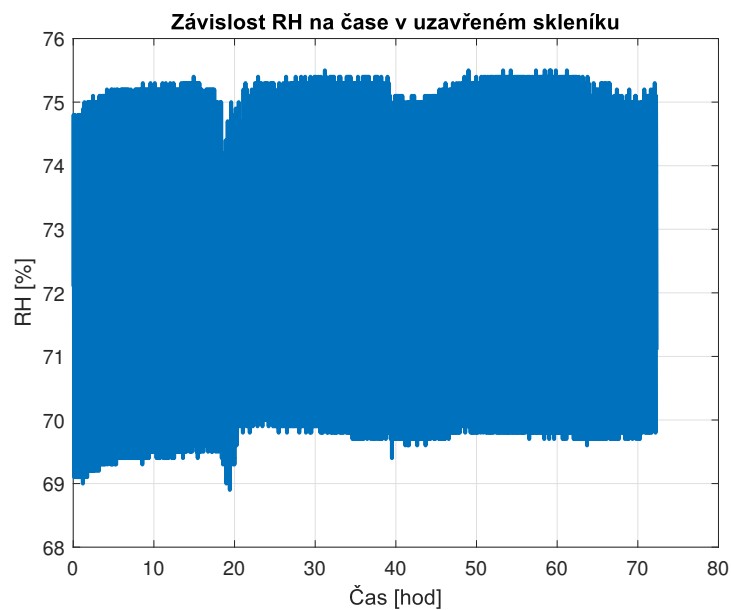
7.2.2 Odvlhčovač 1.1

Vzhledem k poškození odvlhčovače 1.0 jsme jako dočasnou náhradu navrhli odvlhčovač 1.1, který byl vybaven několika vylepšeními, avšak byl velmi podobný předchozí verzi. Hlavním cílem experimentů s novým odvlhčovačem bylo zopakování předchozího scénáře, kdy došlo k selhání Peltierova článku. Součástí nové verze odvlhčovače byl i nový držák. Chladič studené strany jsme posunuli směrem dolů tak, aby horní část Peltierova článku byla v rovině s horní částí chladiče. Tato změna měla výrazně omezit množství kondenzované vody, která se může dostat do blízkosti článku. Dále jsme upravili držák tak, aby umožňoval uchycení chladiče ARCTIC Alpine 17 k držáku pomocí šroubů. Fotografie odvlhčovače 1.1 je na obrázku 7.6.

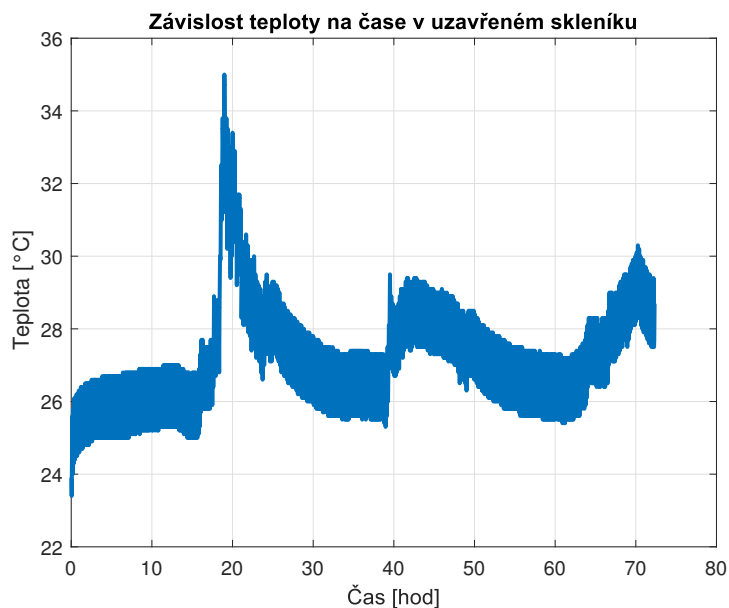


Obrázek 7.6. Sestavený odvlhčovač 1.1

Na obrázcích 7.7 a 7.8 jsou zachyceny průběhy relativní vlhkosti a teploty vzduchu uvnitř skleníku během testu nového odvlhčovače. Testování bylo zahájeno 26. března v 17:00 SELČ a ukončeno 29. března v 17:20. Během testování se nám nepodařilo zopakovat předchozí scénář. Nejvyšší dosažená teplota uvnitř skleníku byla 35 °C. Vlivem vyšší oblačnosti na skleník nesvítilo slunce tolik jako při předchozím experimentu. Vzhledem k předpovědi počasí na další dny jsme se rozhodli po třech dnech testování ukončit a zaměřit se na vývoj nové verze odvlhčovače.



Obrázek 7.7. Test odvlhčovače 1.1 v reálných podmínkách - vývoj relativní vlhkosti vzduchu v čase



Obrázek 7.8. Test odvlhčovače 1.1 v reálných podmínkách - vývoj teploty v čase

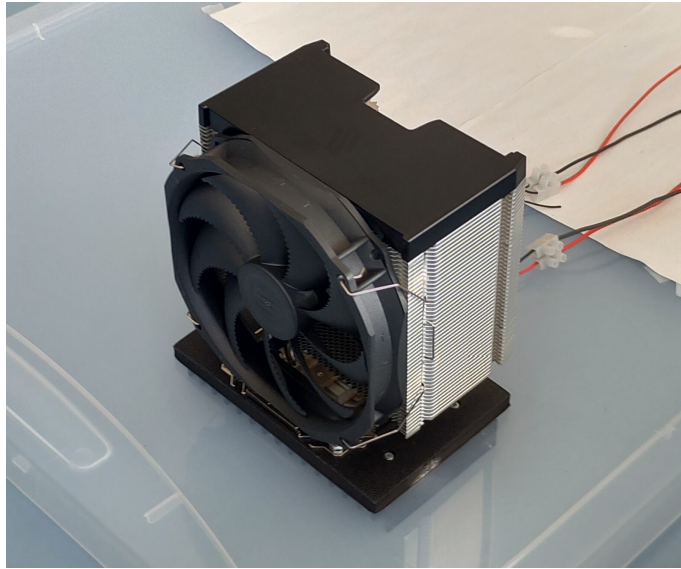
7.2.3 Odvlhčovač 2.0

Předchozí odvlhčovače se celé nacházely uvnitř skleníku. I v době, kdy na skleník nesvítlo slunce se teplota vzduchu uvnitř skleníku pohybovala mezi 25 °C a 29 °C. To znatelně přesahuje ideální teplotu vzduchu pro pěstování většiny rostlin. Vzhledem k velkému množství tepla, které bylo vyzařováno chladičem teplé strany Peltierova článku jsme se rozhodli navrhnout nový odvlhčovač tak, aby se tento chladič nacházel mimo skleník.

Nově navržený odvlhčovač se skládá z Peltierova článku TEC1-127080S a chladiče studené strany článku EZK CHL20B/80 BLK. Jde o stejný chladič jako u předchozích verzí. V případě Peltierova článku jde o stejný typ, ale vzhledem k trvalému poškození původního článku jsme použili nový exemplář. Chladič teplé strany článku jsme vyměnili za větší chladič SilentiumPC Fortis 5 s větším větrákem.

V případě nového návrhu se Peltierův článek nachází v otvoru ve víku skleníku. Otvor jsme do víka vyřízli tak, aby měl stejné rozměry jako článek. Studená strana článku se nachází uvnitř skleníku a strana, ze které je teplo vyzařováno je na vnější straně víka. V programu Fusion 360 jsme navrhli a na 3D tiskárně z materiálu PETG vytiskli podložku, která se nachází na vnější straně víka. K podložce je skrz víko přišroubován chladič studené strany článku. Z druhé strany je k podložce přišroubován i chladič SilentiumPC Fortis 5. Uprostřed podložky je otvor, díky kterému je tento chladič spojen s Peltierovým článkem. Fotografie odvlhčovače je na obrázku 7.9.

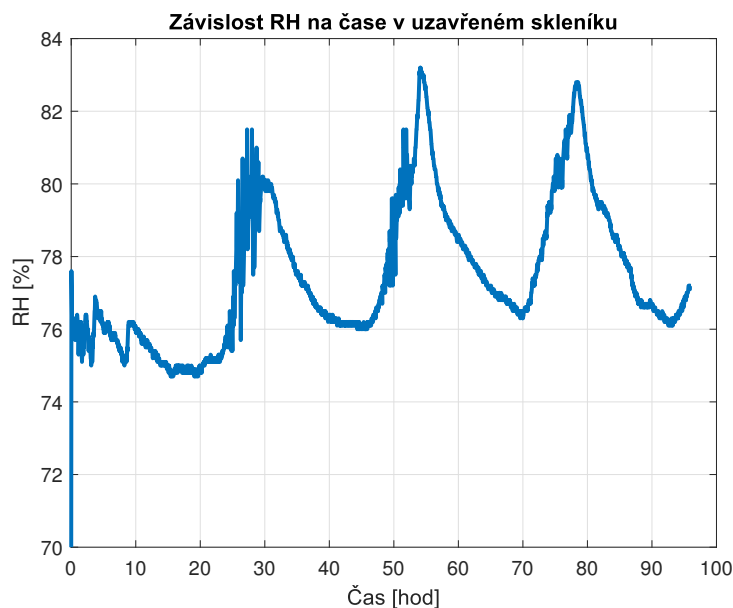
V případě verzí odvlhčovače 1.0 a 1.1 byla vedlejším efektem umístění chladiče teplé strany článku s větrákem uvnitř skleníku i cirkulace vzduchu v rámci tohoto uzavřeného prostředí. Abychom uvnitř skleníku dosáhli rovnoměrnějšího rozložení relativní vlhkosti a teploty vzduchu i v případě použití odvlhčovače 2.0, umístili jsme dovnitř skleníku větrák z chladiče ARCTIC Alpine 17, který využívaly předchozí dvě verze odvlhčovače. Tento větrák byl během testování zapnutý nepřetržitě.



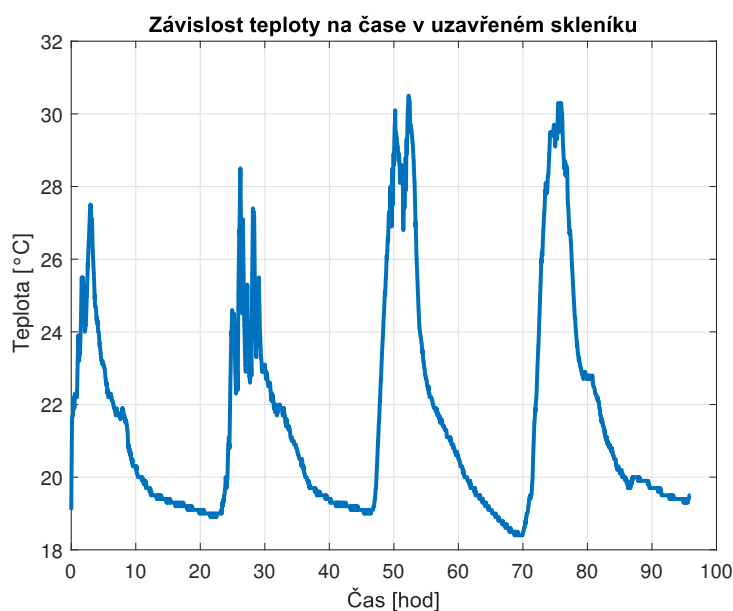
Obrázek 7.9. Odvlhčovač 2.0

Průběhy relativní vlhkosti a teploty vzduchu uvnitř skleníku během testu nového odvlhčovače jsou zachyceny na obrázcích 7.10 a 7.11. Test byl zahájen 28. dubna v 8:00 a ukončen 2. května v 8:00, trval tak přesně čtyři dny. Z grafu na obrázku 7.11 vidíme, že nový návrh odvlhčovače vyřešil problém s vysokou teplotou uvnitř skleníku v případech, kdy na skleník nesvítí slunce. V případě, kdy slunce na skleník svítí, dosáhla teplota až 30,5 °C.

Z grafu na obrázku 7.10 je zřejmé, že samotné odvlhčování vzduchu probíhalo hůře než u předchozích odvlhčovačů. Ačkoli byly hranice relativní vlhkosti vzduchu nastaveny na 70% a 75%, po zapnutí odvlhčovače se relativní vlhkost na spodní hranici nikdy nedostala a odvlhčovač zůstal zapnutý prakticky po celou dobu měření. Kolísání relativní vlhkosti vzduchu během dne souviselo se změnou teploty uvnitř skleníku.



Obrázek 7.10. Test odvlhčovače 2.0 v reálných podmínkách - vývoj relativní vlhkosti vzduchu v čase

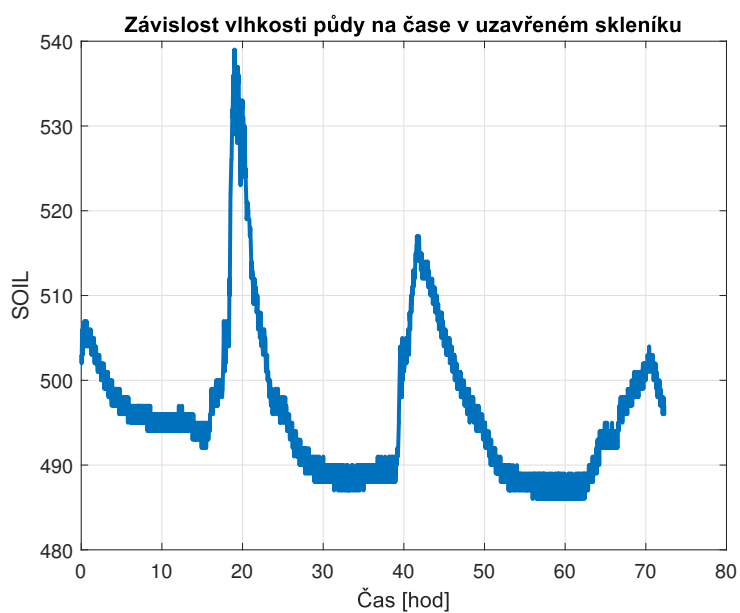


Obrázek 7.11. Test odvlhčovače 2.0 v reálných podmínkách - vývoj teploty v čase

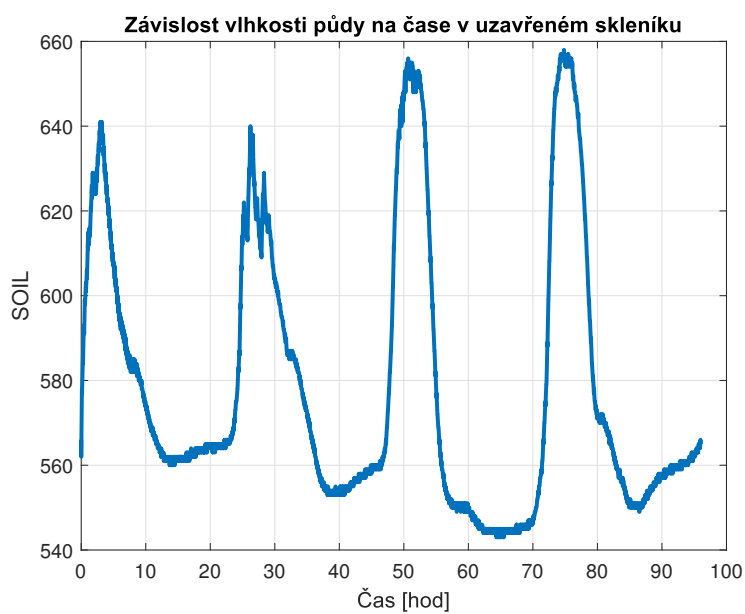
7.3 Zavlažování

Samostatně jsme otestovali ponorné čerpadlo, které pracovalo podle očekávání. Kompletní systém zavlažování tak, jak je popsán v části 5.5 nebyl realizován. Jedním důvodem jsou nedostatečná data o vlhkosti půdy kvůli nevhodně zvolenému, případně umístěnému senzoru vlhkosti půdy. Druhým důvodem je vlastnost substrátu, kdy k největšímu zvlhčení půdy docházelo v těsné blízkosti místa zavlažování a dále pak ve spodní části skleníku, tedy v nejnižších vrstvách substrátu. Vzhledem ke zvolenému návrhu, kdy jsme nevyužili žádný systém pro odvod vody z půdy, zůstává všechna voda použitá při zavlažování v půdě, což zvyšuje riziko přelití rostlin při nesprávném zacházení. Z těchto důvodů nebylo možné zavlažování spolehlivě implementovat.

Na obrázcích 7.12 a 7.13 jsou znázorněny vývoje hodnoty ze senzoru vlhkosti půdy během výše popsaných testů odvlhčovače 1.1 a odvlhčovače 2.0. Hodnota SOIL na vertikálních osách grafů je výstup z AD převodníku, který převádí výstupní napětí senzoru od 0 V do 5 V na diskretní hodnoty od 0 do 1023. Vidíme, že během dne se v souvislosti s teplotou uvnitř skleníku hodnota výrazně mění. Dále tyto hodnoty ani dlouhodobě neodpovídaly očekávaným změnám vlhkosti půdy v důsledku manuálního zalévání.



Obrázek 7.12. Data ze senzoru vlhkosti půdy při testu odvlhčovače 1.1



Obrázek 7.13. Data ze senzoru vlhkosti půdy při testu odvlhčovače 2.0

Kapitola 8

Diskuze

8.1 Testy odvlhčovače

8.1.1 Odvlhčovač 1.0

Peltierův článek při testech odvlhčovače 1.0 selhal ve chvíli, kdy byla uvnitř skleníku nejvyšší teplota. Domníváme se, že právě vysoká teplota byla hlavní příčinou selhání článku. Podle katalogového listu je článek certifikovaný pro teplotu do 90 °C. Tak vysoké teploty uvnitř skleníku samozřejmě dosaženo nebylo, ale nedokážeme vyloučit, že některé části článku této teploty nemohly dosáhnout.

Vysoká teplota v okolí odvlhčovače neumožňuje tak efektivní chlazení chladiče ARCTIC Alpine 17, a tedy i teplé strany článku. Tím byl snížen odvod tepla z článku. Plocha na spodní straně chladiče ARCTIC Alpine 17, která se přes teplovodivou pastu dotýká článku, má navíc kruhový tvar přibližně o průměru délky strany článku. To znamená, že rohy horké strany článku se přímo nedotýkají chladiče. Domníváme se, že právě v těchto místech dosahuje použitý článek nejvyšší teploty. Pokud byl tedy článek poškozen v důsledku přehřátí, pak je pravděpodobné, že k poškození došlo právě v těchto místech.

Kromě poškození přehřátím bývá další běžnou příčinou selhání Peltierova článku mechanické namáhání. Jde především o nerovnoměrně rozprostřený tlak na některou ze stran článku. Další problém může představovat voda, která kondenzuje na chladiči studené strany článku a nachází se tedy v jeho těsné blízkosti. Po obvodu článku je sice nainstalována těsnicí guma, přesto není doporučeno, aby se voda k článku při normálním provozu dostávala. [23]

8.1.2 Odvlhčovač 1.1

Na základě zkušeností z provozu odvlhčovače 1.0 jsme navrhli mírně upravený odvlhčovač 1.1. Při návrhu jsme se snažili omezit potenciálně nežádoucí vliv kondenzované vody na článek a také vylepšit spojení všech částí odvlhčovače tak, abychom omezili nerovnoměrné mechanické namáhání.

Nový odvlhčovač při testování nevykazoval žádné problémy. Jak jsme zmínili v podkapitole 7.2.2, tak se nám nepodařilo replikovat selhání, které potkalo odvlhčovač 1.0, a to z důvodů vysoké oblačnosti, a tedy nižší teploty uvnitř skleníku, než jaká byla zaznamenána při testu předchozí verze odvlhčovače.

8.1.3 Odvlhčovač 2.0

Odvlhčovač 2.0 je vybaven chladičem SilentiumPC Fortis 5, který je výrazně větší než alternativní chladič u předchozí verze odvlhčovače. Nový chladič jsme zvolili proto, že jsme chtěli dosáhnout nižší teploty teplé strany Peltierova článku, a tedy i nižší teploty jeho druhé strany a druhého chladiče. Tím, jak klesá relativní vlhkost vzduchu, snižuje se jeho rosný bod, tedy teplota, při které ke kondenzaci dochází. Přepokládali jsme,

že nižší teplota studeného chladiče umožní kondenzaci vodních par ve vzduchu s nižší relativní vlhkostí, a tedy teoreticky i dosažení nižší relativní vlhkosti uvnitř skleníku. Po zapojení odvlhčovače jsme ověřili, že studený chladič má opravdu nižší teplotu, než tomu bylo v případě předchozích verzí odvlhčovače.

Druhým hlavním důvodem, proč jsme pro tuto verzi odvlhčovače zvolili chladič SilentiumPC Fortis 5, jsou rozměry plochy, kterou se chladič může dotýkat Peltierova článku. Na rozdíl od chladiče ARCTIC Alpine 17 má tato plocha přibližně stejné rozměry, jako jsou rozměry jedné strany článku, tedy 40 mm x 40 mm. To umožňuje rovnoměrné chlazení celé strany článku.

Nevýhodou umístění odvlhčovače 2.0 je nutnost vyříznout otvor do víka skleníku. Tento otvor i přes to, že je prakticky celý vyplněn Peltierovým článkem, dále narušuje uzavřenost celého skleníku. Předpokládáme však, že nejdůležitěji narušuje hermetičnost skleníku mezera mezi skleníkem a víkem. Vzhledem k této mezeře tedy považujeme nevýhodu umístění odvlhčovače za zanedbatelnou.

Nižší relativní vlhkosti vzduchu v porovnání s předchozími verzemi odvlhčovače se nám dosáhnout nepodařilo. Určili jsme tři možné příčiny, které za tímto problémem mohou stát. První příčinou může být výrazně vyšší transpirace během testu odvlhčovače 2.0, než k jaké docházelo u testů předchozích verzí. Testy odvlhčovačů 1.0 a 1.1, které jsou posány v kapitole 7 proběhly přibližně dva týdny od vysazení ředkviček. Na obrázku 7.1 vidíme, jak zhruba vypadaly ředkvičky během těchto dvou testů. Listy ředkviček měly dohromady velmi malou plochu a nemohlo se z nich vypařovat velké množství vody. Naopak test odvlhčovače 2.0 proběhl v době, kdy ředkvičky byly téměř připraveny ke sklizni a měly tedy velké množství rozměrných listů.

Druhou možnou příčinou může být úplná absence víka na nádrži s vodou. Kvůli cirkulaci vzduchu uvnitř skleníku tak mohlo docházet k odpařování vody z nádrže mnohem rychleji, než když byla nádrž z velké části chráněna víkem, ke kterému byly připevněny předchozí verze odvlhčovače. Víko nebylo nainstalováno, aby mohly kapky vody ze studeného chladiče padat do nádrže pod odvlhčovačem.

Třetí potenciální příčina souvisí s umístěním studeného chladiče. Chladič se nachází těsně u víka skleníku a jeho výška je pouze dva centimetry. Adheze, neboli přilnavost vody k chladiči způsobuje, že kondenzované kapky vody nepadají ihned do nádrže, ale zůstávají na povrchu chladiče. Velikost kapek, a tedy jejich hmotnost musí nejprve přesáhnout určitou hranici, aby působící tíhová síla překonala adhezi. Vzniklá vrstva vody na povrchu chladiče snižuje jeho odvlhčovací kapacitu, jelikož omezuje míru kondenzace. U předchozích verzí odvlhčovače tento problém nemusel být tak výrazný, jelikož byl chladič otočený o devadesát stupňů, kapky vody mohly snadněji stékat do nádrže a především přitom s sebou strhly i všechny menší kapky pod sebou. [24]

Řešením uvedených příčin by mohlo být nahrazení chladiče EZK CHL20B/80 BLK za jiný, větší a zejména vyšší chladič. Je pravděpodobné, že abychom dosáhli dostatečně nízké teploty tohoto chladiče, museli bychom nahradit i Peltierův článek za výkonnější typ s větším proudovým odběrem. Tímto řešením bychom dosáhli větší odvlhčovací kapacity. Pokud jsou naše úvahy zejména o první a druhé příčině správné, pak odvlhčovač 2.0 nedokázal dosáhnout dané relativní vlhkosti uvnitř skleníku proto, že se zmíněnými způsoby dostávalo do vzduchu více vody, než kterou je schopný odebrat.

Vysoký nárůst teploty uvnitř skleníku v případech, kdy na něj svítí slunce, považujeme vzhledem k požadavkům rostlin na teplotu vzduchu za nežádoucí. Jako možné řešení se nabízí v našem případě přesunutí skleníku z místa u okna na jiné místo, kde by byl skleník mimo dosah přímého slunečního světla. Dalším možným řešením je využití žaluzií nainstalovaných u okna nebo alespoň částečné zakrytí skleníku neprůhlednou fó-

lí či jiným vhodným materiálem. Komplikovanějším a zároveň energeticky náročným řešením by také mohlo být aktivní chlazení vzduchu uvnitř uvnitř skleníku. Částečné chlazení poskytuje studený chladič, který je součástí odvlhčovače, ale při přímém slunečním svitu je jeho vliv minimální.

8.2 Zavlažování

Automatické zavlažování se nám nepodařilo realizovat ze dvou důvodů, které spolu úzce souvisí. Problém s nevhodným senzorem vlhkosti půdy by mohl být vyřešen pořízením jiného senzoru. Pro přesnější měření by také mohlo být vhodné využít větší počet senzorů umístěných v různých místech skleníku. Použili jsme levný senzor, který je snadno dostupný. Za jeho hlavní nedostatky považujeme rozměry, konkrétně délku, která činí 10 cm. Část senzoru, a tedy i této délky, zabírá nechráněná elektronika, která může při neopatrném používání přijít do kontaktu s vodou. Část sondy, která snímá vlhkost půdy a kterou lze tedy do půdy zasunout, má délku přibližně 5 až 7 cm. Vzhledem k celkové hloubce půdy v našem skleníku, přibližně 16 cm, měří použitý senzor vlhkost jen v horní části substrátu.

Substrát jsme se rozhodli umístit přímo na dno skleníku a nevyužili jsme žádný systém pro odvod vody. Evapotranspirace je jediným způsobem, díky kterému se prostřednictvím odvlhčovače voda dostává zpět do nádrže. Toto rozhodnutí významně zvyšuje riziko přelítí pěstovaných rostlin. Větší množství vody, které by se v případě přelítí nacházelo ve spodní části skleníku, by vytvořilo prostředí vhodné pro výskyt plísní a bakterií ohrožujících kořeny rostlin. Pěstování rostlin tímto způsobem však není neobvyklé. Problémem, se kterým jsme se v souvislosti s rozhodnutím nevyužít systém odvodu vody setkali, bylo nerovnoměrné rozložení vlhkosti. Po zalití se nejvíce vody nacházelo v těsné blízkosti místa zalití, přičemž voda pak postupně klesala ke dnu skleníku. Jen několik centimetrů od místa zalití, například v okolí použitého senzoru vlhkosti půdy, byla horní část půdy stále suchá. Tento problém by mohla alespoň částečně vyřešit dostupná aditiva, která se v podobných situacích používají. Jde například o perlit, kůru nebo aktivní uhlí. Tato aditiva zabraňují zhutnění půdy, snižují míru odpuštění vody půdou, poskytují provzdušnění a zejména napomáhají rovnoměrnějšímu rozptřeni vody v půdě. [25]

Dalším řešením, které by podle nás zlepšilo rozložení vody v půdě je náhrada navrženého koryta tvaru kříže, které mělo distribuovat vodu po povrchu substrátu, za hustší síť hadiček. Hadička s otvory po celé své délce by mohla rozvést vodu na větší plochu než původní koryto. Za nevýhodu takového návrhu považujeme při použití hustší sítě hadiček částečné omezení plochy, na které mohou být vysazeny rostliny.

Systém pro odvod vody z půdy jsme nenavrhovali z důvodu jeho předpokládané komplexnosti. Takovým systémem by mohlo být například využití truhlíků s odtokovými otvory, kterými by odtékala přebytečná voda. Tato voda by poté byla čerpána zpět do nádrže na vodu. Za hlavní nevýhody takového návrhu považujeme nutnost využití dalšího čerpadla, které by vodu čerpalo do nádrže. Systém by bylo možné navrhnout i tak, že by se nádrž na vodu nacházela v nejnižší části skleníku a voda by do ní stékala vlivem gravitace. Takový návrh by vyžadoval značný prostor pod truhlíky. Kvůli omezené výšce vnitřního prostoru použitého skleníku nám toto řešení nepřijde vhodné. Alternativou k truhlíkům by mohla být odvodňovací meliorace, tedy využití drenážních trubek na dně skleníku, ze kterých by byla voda odčerpávána do nádrže.

8.3 Osvětlení

Osvětlení během testů fungovalo podle našich očekávání. Počet použitých LED diod nepovažujeme za dostatečný pro úplné nahrazení slunečního světla. V případě, že bychom chtěli skleník umístit mimo dosah slunečního světla, případně zakrýt celý skleník neprůsvitným materiálem, bylo by nutné přidat další LED moduly. To však nepovažujeme za problém. Pokud by měl proudový odběr takového rozšířeného systému osvětlení přesáhnout možnosti použitého DC-DC měniče, pak by bylo nutné využít výkonnější zdroj 5 V.

8.4 Skleník

Využití plastového úložného boxu jako skleníku považujeme za vhodné řešení. I přes to jsme identifikovali pár problémů, respektive nevýhod našeho konkrétního řešení. Jedním z nich jsou rozměry skleníku, přesněji jeho výška. Použili jsme jeden z největších dostupných úložných boxů, přesto se domníváme, že ideálně by skleník mohl být ještě vyšší. Současné rozměry byly tak akorát dostačující pro pěstování malých rostlin, jako jsou ředkvičky. Mnoho jiných rostlin vyžaduje více prostoru v půdě, tedy vyšší vrstvu substrátu, nebo naopak více prostoru pro svou horní část s listy. Vyšší skleník by tak významně rozšířil portfolio rostlin, které v něm lze pěstovat.

Skleník je celý průhledný a umožňuje průchod slunečního světla i k substrátu, který se nachází v těsné blízkosti stěn. Po několika týdnech používání skleníku jsme zaznamenali růst zelených řas ve spodních částech substrátu pod průhlednou nádrží na vodu a na stranách skleníku, na které svítí slunce přímo. Přítomnost vlhkosti v nižších vrstvách substrátu a přímého slunečního světla vytváří ideální podmínky pro růst těchto fotosyntetizujících organismů. Řasy samy o sobě pěstovaným rostlinám neškodí, ale stejně jako jiné rostliny i řasy ke svému růstu potřebují živiny. Řasy tedy mohou ovlivnit růst pěstovaných rostlin, jelikož spotřebovávají stejné živiny, které jsou určeny rostlinám. Tento problém můžeme vyřešit zneprůhledněním částí stěn skleníku, které znemožní růst řas. Využití neprůhledných truhlíků pro pěstování rostlin by také tento problém vyřešilo. [26]

Co se týče uzavřenosti našeho skleníku, tak jsme s řešením spokojeni. Pro neexistující těsnění mezi skleníkem a jeho víkem nemůžeme hovořit o hermeticky uzavřeném prostoru. Na základě výsledků našich experimentů však můžeme považovat skleník za uzavřený, jelikož takové prostředí velmi dobře simuluje, alespoň z hlediska relativní vlhkosti vzduchu.

Kapitola 9

Závěr

V rámci práce jsme navrhli, postavili a otestovali uzavřený skleník a jednotku umožňující řízení klimatických podmínek vhodných pro růst rostlin uvnitř tohoto skleníku.

V kapitole 2 jsme identifikovali nejvýznamnější faktory, které ovlivňují růst rostlin a popsali některé způsoby řízení těchto faktorů uvnitř uzavřeného skleníku. V kapitole 3 jsme se zaměřili na několik již existujících řešení podobného problému. Podívali jsme se na velmi rozdílné koncepty sahající od malého chytrého skleníku pro domácnosti až po velkou hermeticky uzavřenou komoru určenou pro rozsáhlé vědecké experimenty. V dalších kapitolách jsme popsali návrh našeho systému. První fyzickou část systému tvoří samotný skleník, který je vybaven odvlhčovačem, osvětlením a potřebnými senzory. Druhou částí je řídicí jednotka, díky které můžeme regulovat podmínky uvnitř skleníku, sbírat data, ukládat je na SD kartu a předávat informace o podmínkách uvnitř skleníku uživateli prostřednictvím LCD displeje. Testy systému a jejich výsledky jsou popsány v kapitole 7.

Některé části se nám nepodařilo plně implementovat nebo jsme během práce narazili na problémy, které neumožňují činnost celého systému v takové míře, jak jsme původně očekávali. Identifikované problémy jsou podrobněji popsány v kapitole 8, kde jsou zároveň navržena jejich možná řešení. Cílem budoucích prací na autonomní pěstební jednotce tak bude implementace vhodných řešení. Na základě našich experimentů by mělo jít zejména o nový systém automatického zavlažování, respektive rovnoměrné distribuce vody v rámci substrátu a úpravu odvlhčovače za účelem zvýšení jeho odvlhčovací kapacity.

Literatura

- [1] Kuan Chong Ting, Tao Lin a Paul C Davidson. Integrated urban controlled environment agriculture systems. *LED lighting for urban agriculture*. 2016, 19–36.
- [2] Ann Marie VanDerZanden. *Environmental factors affecting plant growth*. 2008. <https://extension.oregonstate.edu/gardening/techniques/environmental-factors-affecting-plant-growth>. Cit. 2023-05-01.
- [3] Arie De Gelder, JA Dieleman, GPA Bot a LFM Marcelis. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2012, 87 (3), 193–202.
- [4] Redmond R. Shamshiri. *Next-Generation Greenhouses for Food Security*. Rijeka: IntechOpen, 2021. ISBN 978-1-83968-076-2. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92515>.
- [5] SUNBELT Sales. *A Guide to Compressor and Desiccant Dehumidifiers*. 2022. <https://www.sunbeltsales.co.uk/news-2/a-guide-to-compressor-and-desiccant-dehumidifiers-2>. Cit. 2023-05-02.
- [6] Dehumidifier buyer's guide. *Thermo-Electric Dehumidifier Reviews*. <https://www.dehumidifierbuyersguide.com/thermo-electric-dehumidifier-reviews/>. Cit. 2023-05-02.
- [7] Jaroslav Reichl. *Peltierův jev*. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>. Cit. 2023-05-02.
- [8] Dave Marshall-George. *Dehumidification – a hot topic*. <https://www.condair.co.uk/knowledge-hub/dehumidification-a-hot-topic>. Cit. 2023-05-03.
- [9] Growmarket. *Vliv vlhkosti, teploty a VPD na pěstování rostlin*. 2020. <https://www.growmarket.cz/a/vliv-vlhkosti-teploty-a-vpd-na-pestovani-rostlin>. Cit. 2023-05-04.
- [10] Robin Metsaots. *What Is and How to Calculate Vapour Pressure Deficit (VPD)?* 2018. <https://betterorganix.com/blog/what-is-how-to-calculate-vapour-pressure-deficit/>. Cit. 2023-05-04.
- [11] Nicholas Engler a Moncef Krarti. Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, 141 110786.
- [12] Samson Reiny. *NASA Study: Rising Carbon Dioxide Levels Will Help and Hurt Crops*. 2017. <https://nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-study-rising-carbon-dioxide-levels-will-help-and-hurt-crops>. Cit. 2023-05-05.
- [13] *Plantee – The Smart Indoor Greenhouse*. 2021. <https://www.kickstarter.com/projects/2097422537/plantee-the-smart-indoor-greenhouse>. Cit. 2023-05-10.

- [14] KC Morgan. *Mini greenhouse grows endless possibilities*. 2021.
<https://inhabitat.com/mini-greenhouse-grows-endless-possibilities/>. Cit. 2023-05-11.
- [15] *Plantee*. 2023.
<https://plant.ee/en-cz>. Cit. 2023-05-12.
- [16] *BINDER*. 2023.
<https://www.binder-world.com/int-en>. Cit. 2023-05-07.
- [17] *ProfiLab24*. 2023.
<https://profilab24.com/>. Cit. 2023-05-07.
- [18] *Freight Farms*. 2023.
<https://www.freightfarms.com/>. Cit. 2023-05-07.
- [19] WF Dempster, M Van Thillo, A Alling, JP Allen, S Silverstone a M Nelson. Technical review of the Laboratory Biosphere closed ecological system facility. *Advances in Space Research*. 2004, 34 (7), 1477–1482.
- [20] *The Laboratory Biosphere*. 2023.
<https://biospherefoundation.org/project/lab-biospheres/>. Cit. 2023-05-08.
- [21] Narayan Kalaburgi. *Working of DHT sensor – DHT11 and DHT22*. 2021.
<https://nerdyelectronics.com/working-of-dht-sensor-dht11-and-dht22/>. Cit. 2023-05-14.
- [22] Colin M.L. Burnett. *A single master and a single slave on a Serial Peripheral Interface (SPI) bus*. 2006.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SPI_single_slave.svg. Cit. 2023-05-16.
- [23] Jeff Smoot. *Important Factors for Improved Peltier Module Reliability*. 2020.
<https://www.digikey.cz/en/articles/important-factors-for-improved-peltier-module-reliability>. Cit. 2023-05-22.
- [24] Wang Huajun a Qi Chengying. Experimental study of operation performance of a low power thermoelectric cooling dehumidifier. *International Journal of Energy and Environment*. 2010, 1 (3), 459–466.
- [25] Pistils Nursery. *How to Plant in a Pot Without Drainage Holes*. 2015.
<https://pistilsnursery.com/blogs/journal/how-to-plant-in-a-pot-without-drainage-holes>. Cit. 2023-05-23.
- [26] Caroline. *Is Algae Harmful To Potted Plants?*
<https://planthouseplant.com/is-algae-harmful-to-potted-plants/>. Cit. 2023-05-23.



Příloha A

Seznam elektronických příloh

Přílohou k bakalářské práci je software pro Arduino MEGA 2560 popsaný v kapitole 6. Ten je prezentován souborem main.ino v adresáři main.