



ALGAIR20

Levänilmauslaite

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Tieto- ja viestintätekniikan, Biotalouden koulutus

2024

Kalle Lehtinen

Tieto- ja viestintätekniikka, Biotalous

Tekijä Kalle Lehtinen

Työn nimi ALGAIR20

Ohjaaja Ari Hietala

Tiivistelmä

Vuosi 2024

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin leväilmauslaite, joka mahdollistaa pumpatun ilman määrän säätämisen ja mittaamisen levän kasvatusalustoihin. Työn tavoitteena oli luoda toimiva ja helppokäyttöinen laite, joka toimii niin ilmauksen säätäjänä kuin datan kerääjänä.

Kyseessä on siis tilaustyö ja työn taustalla oli tarve kehittää ilmauslaite, joka pystyy säätämään ja lukemaan ilman hiilidioksidipitoisuutta sekä ilmavirtaa. Toimeksiantajana toimi HAMK BIO, Hämeen ammattikorkeakoulun biotuotantotekniikan laboratorio.

Keskeinen sisältö koostuu laitteen suunnittelusta, komponenttien valinnasta, laitteen valmistuksesta ja testauksesta. Suunnitteluvaiheessa käytettiin paljon 3D-suunnittelua fyysisten osien prototypointiin ja suunniteltujen osien valmistuksessa hyödynnettiin 3D-tulostusta ja perinteisiä valmistusmenetelmiä. Laitteen toiminnallisuus testattiin laboratorio-olosuhteissa, ja sen suorituskykyä arvioitiin eri kahdella testauskierroksella.

Saatujen tulosten perusteella laite osoittautui toimivaksi ja hyödylliseksi tilaajan tarpeisiin. Tutkimustyön tuloksena voidaan todeta, että laite täyttää asetetut vaatimukset ja tarjoaa haluttua hyötyä käyttäjälleen. Esimerkiksi ilman säädöt ja hiilidioksidin sekoitus toimivat moitteettomasti, mutta ohjelmiston kehityksessä koettiin ongelmia, joiden ratkaisemiseen tarvitaan jatkokehitystä.

Avainsanat ilmauslaite, ilmansäätö, hiilidioksidin mittaus, 3D-suunnittelu

Sivut 27 sivua

The aim of this thesis was to design and implement an algae aeration device for regulating and measuring the airflow into algae cultivation substrates. Commissioned by HAMK BIO, the bioproduction technology laboratory of Häme University of Applied Sciences, the project addressed the need for an efficient aeration system capable of adjusting carbon dioxide levels and airflow rates.

The core content of the thesis consisted of the background study underscoring the necessity for a versatile aeration device capable of fine-tuning environmental conditions for optimal algae growth. The project aimed to create a user-friendly device serving both as an aeration controller and a data collector.

The functional part of the thesis included the design, component selection, manufacturing, and the testing phases of the device, i.e., ALGAIR20. The extensive use of 3D design facilitated the prototyping of physical components, with a combination of 3D printing and traditional manufacturing methods employed for fabrication. In addition, the functionality of the device was tested in laboratory conditions, with performance assessed through iterative, two testing rounds.

Based on the results, the device proved to be effective and useful meeting the commissioner's requirements. For example, airflow adjustments and carbon dioxide mixing operated seamlessly, fulfilling the intended purpose. However, challenges were encountered during the software development. Therefore, further refinement and development for optimal performance are required in the future.

In conclusion, the implemented algae aeration device fulfills its intended objectives, providing a valuable tool for algae cultivation. The successful outcome of this project highlights the importance of tailored solutions in bioproduction technology, with implications for research and industrial applications.

Keywords Air purifier, climate control, Algair, 3D design

Pages 27 pages and appendices 7 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Toimeksianto	1
2.1	Vaatimusmäärittely	1
2.2	Aikataulu	2
3	Laitekehitys	2
3.1	Laitekehityksen perusteet	2
3.2	Erytispiirteet tutkimuskäytössä	3
3.3	Raspberry Pi laitekehityksen alustana	4
4	Laitteen suunnittelu, valmistus ja testaus	7
4.1	Suunnittelu	7
4.1.1	Rakenne	8
4.1.2	Kotelo	8
4.1.3	Letkut	9
4.1.4	Säätimet	10
4.1.5	Sensorit	10
4.1.6	Co2 diffuusio ja ilman jakautuminen	11
4.1.7	Käyttöliittymä ja datan tallennus	11
4.2	Valmistus	12
4.2.1	Kotelo	12
4.2.2	Diffuusiokotelo	14
4.2.3	Jakoblokki	15
4.2.4	Ilmankulku laitteessa	15
4.2.5	Säätimet	15
4.2.6	Mikro-ohjain	16
4.2.7	Sensorit	18
4.2.8	3D-tulostus ja suunnittelu	20
4.3	Esitestaus	22
4.3.1	Testausympäristö	22
4.3.2	Testauksen toteutus	22
4.4	Lopputestaus	24
5	Johtopäätökset ja pohdinta	26
	Lähteet	27

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Global IoT Trends 2022 (Farnell, 2022.)	5
Kuva 2. Laitteen flow chart.....	8
Kuva 3. Ilmauslaite kasvatuskaapin vieressä	9
Kuva 4. Diffuusiokoteloiden iterointia	11
Kuva 5. Ilmauslaite kasattuna	12
Kuva 6. Suunniteltu ja 3d-tulostettu etulevy	13
Kuva 7. Säästöpaneelien asennus.....	13
Kuva 8. Säästöventtiilit laitteen sisältäpäin	14
Kuva 9. Lopullinen diffuusiokotelo	14
Kuva 10. Jakoblokki 1:6, versio 1 (harmaa) ja versio 2 (musta).....	15
Kuva 11. EAS2000-F02 vastusvastaventtiilit.....	16
Kuva 12. Raspberry PI kytkentärima	17
Kuva 13. Multiplekserin kytkentärima ja DIP-kytkimet	17
Kuva 14. Multiplekserissä kiinni viisi FLOW-sensoria.....	18
Kuva 15. FLOW-sensorin kytkentä.....	18
Kuva 16. FLOW-sensorit asennettuna etulevyyn	19
Kuva 17. PAS-sensori asennettuna	20
Kuva 18. Prusa i3 MK3 tulostin	21
Kuva 19. Bambulab x1 carbon tulostin	21

Kuva 20. Rotametri Kytola E3K-TL24.....	23
Kuva 21 Testi tulos analyysi.....	23
Kuva 22. Ilmauslaite testausympäristössä	24
Kuva 23. Ohjelma pysähtynyt 657 mittauskierroksen jälkeen	25
Kuva 24. Lopullinen kuva laitteesta	26

1 Johdanto

Levän kasvihuoneviljelyssä on tärkeää optimoida ympäristötekijöitä, kuten hiilidioksidipitoisuutta ja ilmavirtausta, jotta levän kasvu voisi saavuttaa parhaan mahdollisen lopputuloksen. Tässä opinnäytetyössä kehitetään innovatiivinen laite, joka pitää sisällään levän ilmauslaitteen suunnittelun, rakentamisen, testauksen ja toimivuuden arvioinnin. Aluksi tarkasteltiin toimeksiantajan vaatimuksia leväilmauslaitteelta ja käytiin läpi laitesuunnittelun yleisiä näkökulmia.

Suunnitteluosiossa tutkitaan levän ilmauslaitteen teknisiä ja rakenteellisia ratkaisuja, ja valmistusosiossa kerrotaan valmistuksen eri vaiheet ja valitut tekniset ratkaisut.

Testausosio käsittää esitestauksen ja käyttöönottotestauksen. Kunkin testivaiheen tulokset ja tehdyt muutokset arvioidaan perusteellisesti ja raportoidaan. Projektin päätteeksi tehdään yhteenveto toimeksiannon kokonaisuudesta, arvioidaan laitteen toimivuutta objektiivisesti ja otetaan huomioon tilaajan antama palaute. Yhteenvedossa pohditaan myös mahdollisia kehityssuuntia tämän levän ilmauslaitteen osalta.

2 Toimeksianto

Levän ilmauskoneen kehittämistilauksen on tehnyt Hämeen ammattikorkeakoulun HAMK BIO, joka on yksi HAMK:in tutkimustyöhön erikoistuneista yksiköistä. Opinnäytetyönä valmistuva prototyyppi, käyttöliittymä ja dokumentaatio toimitetaan tilaajalle kehitystyön päätyttyä. Projektin päätarkoitus on tukea laboratorio-olosuhteissa tapahtuvaa levän kasvatusta, luomalla laite asiakkaan tarpeiden pohjalta.

2.1 Vaatimusmäärittely

Laitteiston suunnittelun keskiössä on laboratorio-olosuhteissa tapahtuva levän kasvatuksen ilmaamisen hallinta ja datatietojen tallentaminen. Tämän laitteen tavoitteena on mahdollistaa ilmaaminen 20 kasvatusalustalla. Laitteeseen voidaan liittää erillinen pumppu tai paineilma sekä CO₂-hiilidioksidin lähde. Laite tarjoaa tarkan hiilidioksidipitoisuuden säätömahdollisuuden ja lisäksi mahdollistaa jokaisen kasvatusalustan lähdön ilmavirtauksen erillisen säädön. Näin käyttäjälle tarjoutuu tarkka tietoisuus ja hallinta levän

kasvuolosuhteisiin. Se on erityisen tärkeää optimaalisen kasvun ja kehityksen varmistamiseksi levälle.

Laitteen suunnittelussa otetaan huomioon käytännöllisyys ja tehokkuus, tehden siitä tarpeet täyttävä ratkaisun laboratorio kasvatukseen. Laitteen rakentamisessa pitää ottaa huomioon sen kestävyys laboratorio-olosuhteissa, eikä laitteen fyysinen koko ei saa kasvaa kohtuuttoman suureksi. Myös laitteen helppo ja selkeä käytettävyys on yksi kriteeri. Laitteen tulee tunnistaa kasvin yö- ja päiväkierto ja lopettaa ilman rikastaminen hiilidioksidilla yön ajaksi.

2.2 Aikataulu

Opinnäytetyön vastaanottaminen tapahtui lokakuussa 2023. Opinnäytetyön suunnittelu alkoi marraskuussa 2023. Laitteen valmistumisen ajankohdaksi sovimme kevään 2024 ja kahden viikon loppukäyttäjän testauksen ajankohdaksi sovimme tilaajan kanssa kevään 2024.

Opinnäytetyön kirjallinen raportti valmistuu samassa ajassa ja viimeistellään kun laite on testattavana tilaajalla. Raportin on kuitenkin tarkoitus valmistua viimeistään Toukokuussa 2024

3 Laitekehitys

Tässä luvussa käsitellään laitekehityksen historiaa ja perusteita, tutkimuskäyttöön suunnattujen laitteiden erityispiirteitä ja Raspberry Pi:n käyttöä laitekehityksen alustana. Tiedot on haettu luotettavista lähteistä ja niiden paikkansapitävyys on todettu perusteellisen dokumentoinnin ja validoinnin avulla.

3.1 Laitekehityksen perusteet

Laitekehitys on kehittynyt merkittävästi ajan kuluessa. Alkuvaiheissa laitekehitys liittyi ihmiskunnan perustarpeiden tyydyttämiseen ja varhaisimmat laitteet olivat pääasiassa yksinkertaisia työkaluja, esineitä ja aseita, ne oli valmistettu kivistä, puusta ja luista.

Ajassa hieman eteenpäin mentäessä, antiikin kulttuureissa kehitettiin edistyneempiä mekaanisia laitteita. Tällainen oli esimerkiksi vesipyöriä, joka hyödyntää veden virtausta tuottaakseen liikettä ja voimaa erilaisiin tarpeisiin siipipyörän avulla. Keskiajalla ja

renessanssissa teknologinen kehitys jatkui erityisesti Euroopassa, silloin kehitettiin muun muassa kellot ja kompassit (Nielsen & clipboard, 2024).

Teollisen vallankumouksen myötä laitekehitys otti suuren harppauksen eteenpäin. Höyrykoneen kehittäminen mahdollisti teollisen tuotannon laajamittaisen käyttöönoton, mikä muutti radikaalisti tuotannon ja yhteiskunnan rakenteita. 1900-luvulla laitekehitys koki valtavia harppauksia eteenpäin, erityisesti sähköisen ja elektronisen tekniikan tullessa käytäntöön. Maailman ensimmäinen sähköisesti toimiva tietokone kehitettiin 1945 ENIAC (Kotilainen, 2024). Tästä hetkestä alkoi tietotekniikan vallankumous ja se mahdollistaa nykypäiväisen jatkuvan ja nopean aikavälin laitekehityksen.

Laitekehitys on lähtökohtaisesti aina uuden luomista tai vanhan parantamista. Laitekehitysprosessi alkaa usein tarpeiden tunnistamisesta ja määrittelystä. Ennen kuin suunnitellaan yhtään piiriä tai valitaan ainuttakaan komponenttia, on tärkeää ymmärtää, millainen tarve tai ongelma laitteen on tarkoitus ratkaista. Nykypäivänä voidaan edelleen kehittää myös täysin mekaanisia laitteita, mutta elektroniikka on hyvin vahvasti läsnä nykypäivän laitekehityksessä.

3.2 Erityispiirteet tutkimuskäytössä

Tutkimuskäyttöön suunnattujen laitteiden kehitys eroaa merkittävästi tavallisten kuluttajalaitteiden kehittämisestä. Pelkästään tuotantomäärien erot ja tämän vuoksi laitteiden kappalehinnat poikkeavat rajusti toisistaan. Lisäksi kuluttajalaitteilla haetaan lähes poikkeuksetta rahallista hyötyä, mutta tutkimuskäytössä intressit ovat yleensä tutkimuksen tuomissa hyödyissä. Kuitenkin myös kuluttajatuotteiden taustalla on tutkimusta, joka ei poikkea ns. ”tutkimuskäyttöön” suunnattujen laitteiden kehityksestä. Kehityksen suunnat erkanevat vasta siinä, kun kaikki todetaan toimivaksi. Tästä jatkuu kuluttajatuotteen jatkokehitys markkinoille ja siinä prosessissa katsotaan hintaa, elinkaarta yms.

Dokumentoinnin ja testauksen tulee olla sellaisella tasolla, että se voidaan toistaa luotettavasti asiaan koulutetun henkilön toimesta. Ilman tarkkaa dokumentointia ja validointia laitteen tekemien mittausten pohjalta ei voida tehdä tieteellisiä julkaisuja. Tämä edellyttää tarkkaa suunnittelua, komponenttien kalibrointia ja tarkkaa laadunvalvontaa.

Tutkimustarpeet saattavat muuttua hyvinkin nopeasti ja laitteiden tulisi olla helposti muokattavissa erilaisiin kokeisiin ja kokonaisuuksiin. Tässä voidaan hyödyntää laitteen modulaarista rakennetta, jossa osia voidaan helposti vaihtaa, lisätä tai poistaa.

Tutkimuskäyttöön suunnitellut laitteet vaatia usein uusimpien teknologioiden huomioon ottamista ja mahdollisesti kokonaan uuden kehittämistä. Yleensä ongelma tai tarve on jollain tasolla tiedossa ja niihin tulee löytää ratkaisu.

Tutkimuslaitteet ovat usein suunniteltu hyvin spesifiin tarkoitukseen, mikä tarkoittaa, että ne voivat olla erittäin erikoistuneita ja eivät välttämättä sovellu yleiskäyttöön. Tutkimuslaitteiden kysyntä on rajallista ja niitä valmistetaan yleensä pienissä erissä. Tämän vuoksi yksittäisten laitteen hinta voi olla huomattavasti korkeampi kuin tavallisen massatuotantolaitteen hinta.

Tutkimuslaitteiden on usein täytettävä kansainväliset ja kansalliset turvallisuusstandardit esimerkiksi ISO-standardit. Ne määrittelevät laitteiden suunnittelun, valmistuksen ja käytön turvallisuusvaatimukset. Tämänkin vuoksi laitekehityksen tuotokset ovat hyvinkin yksilöllisiä. Vaikka laitteistot olisivat toimintaperiaatteeltaan hyvin samanlaisia niin laitteiden käyttö kohde vaikuttaa standardeihin.

Kehitettyjen laitteiden on myös oltava käyttäjäystävällisiä, jotta tutkijat voivat käyttää niitä tehokkaasti ilman tarpeetonta opettelua. Yleensä laitteen käyttäjät ovat erikoistuneet tutkittavaan asiaan eivätkä ole teknisten laitteiden asiantuntijoita.

Koska tutkimus voi sisältää vaarallisia aineita, reaktioita tai muuten hankalia prosesseja, laitteiden tulee täyttää vaadittavat turvallisuusvaatimukset. Usein arkaluontoisen tiedon käsittely on otettava huomioon jo hyvin varhaisessa vaiheessa laitesuunnittelua. Tutkimuksessa käytettävät laitteet ovat usein yhteydessä yhtiöiden tietojärjestelmiin, jotka keräävät ja analysoivat suuria määriä dataa. Tämä data on usein hyvin arvokasta tutkimuksen kannalta ja siksi sen turvallisuus ja hallinta on syytä suunnitella erittäin hyvin.

3.3 Raspberry Pi laitekehityksen alustana

Raspberry Pi on pieni SBC tietokone (single board computer), joka tarjoaa tietokoneen suorituskyvyn kompaktissa muodossa. Se kehitettiin alun perin opetuskäyttöön, mutta siitä on tullut erittäin suosittu laite harrastajien prototyyppikehityksessä, IoT-sovelluksissa, teollisuuden automaatioissa ja älykoteknologiassa (Raspberry Pi Foundation, 2022).

Raspberry Pi:ssä on yleensä Broadcomin suunnittelema ARM-pohjainen (Advanced RISC Machine) mikroprosessori, 1–8 GB RAM-muistia, USB-portteja, yksi tai useampi HDMI-liitäntä näyttöjen liittämiseksi, WLAN (Wireless Local Area Network) ja Ethernet-portti (RJ45) verkkoyhteyksiä varten, bluetooth yhteys sekä GPIO-pinnejä (General Purpose

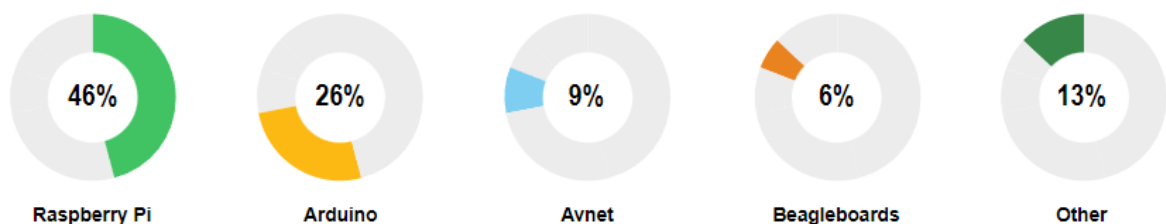
Input/Output), jotka mahdollistavat sen kytkemisen ja ohjelmoinnin erilaisten antureiden ja laitteiden kanssa (Raspberry Pi Foundation, 2022). Raspberrylle on tehty useita avoimesti saatavilla olevia linux pohjaisia käyttöjärjestelmänversioita. Yleisin niistä on Raspberry Pi OS, joka yleisemmin nimellä Raspbian (Raspberry Pi Documentation, n.d.)

Raspberry Pi on monipuolinen ja helppokäyttöinen laite, joka tarjoaa laajan valikoiman mahdollisuuksia erilaisten projektien toteuttamiseen. Sen alhainen hinta tekee erittäin houkuttelevan alusta vaihtoehtoon niin harraste-, opiskelu- kuin ammattikäyttöön. Se antaa mahdollisuuden toteuttaa monimutkaisiakin tehtäviä, kuten tietojenkäsittelyä, koneoppimista, multimediaa ja paljon muita (Raspberry Pi Foundation, 2022).

Sen ympärille on rakentunut suuri ja monipuolinen yhteisö, joka tukee sitä aktiivisesti tarjoamalla valtavan määrän ohjeita, projekteja, kirjastoja ja sovelluksia, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehtoon laitekehitykseen ja prototyyppien rakentamiseen (Raspberry Pi Foundation, 2022).

Myös Farnellin tutkimus osoittaa, että suosituin sulautettu kortti tuotekehitykseen on Raspberry Pi. Raportin mukaan 50 % ammattisuunnittelijoista hyödyntää SBC-kortteja teollisissa sovelluksissa ja IoT-suunnittelussa. Näistä suosituin oli Raspberry Pi, jota suosii 46 % ammattikäyttäjistä. (Farnell, 2022)

Kuva 1. Global IoT Trends 2022 (Farnell, 2022.)



Esimerkkejä Raspberry Pi:n käyttötarkoituksista ja projekteista

Koti- ja viihde-elektroniikka:

- Mediasoitimet ja -keskukset
- Älykkäät kaiuttimet ja äänentoistojärjestelmät
- Kotiteatterijärjestelmät

- Digitaaliset mainosnäytöt

Kotiälyjärjestelmät ja IoT:

- Älyvalaistusjärjestelmät
- Etävalvontakamerat ja -järjestelmät
- Lämpötilan, kosteuden ja ilmanlaadun seurantajärjestelmät
- Automaattiset sähkönhintaan perustuvat ratkaisut

Tietotekniikka ja tietoturva:

- VPN-palvelimet ja -verkot
- Verkkotulipalvelimet ja reitittimet
- Langattomat verkot ja WiFi-tukiasemat
- Henkilökohtaiset pilvipalvelut ja tiedostojenjakopalvelimet

Koulutus ja oppiminen:

- Tietokoneohjelmointi- ja robotiikka
- Elektroniikan ja tietotekniikan oppimisprojektit
- STEM-opetus (Science, Technology, Engineering, Mathematics)

Robotiikka ja automaatio:

- 3D-tulostimien ohjaukset (Octoprint)
- Käsittelyrobotit ja valmistusautomaatio
- Kodin robottiapulaiset ja -palvelimet
- Teollisuusrobottien ohjausjärjestelmät

Pelit ja viihde:

- Retropeleihin perustuvat pelikonsolit
- Emulaattoreita eri alustoille kuten esimerkiksi NES, SNES, Sega Genesis
- Musiikin ja äänitehosteiden syntetisointijärjestelmät

Kehittyneet elektroniikkaprojektit:

- Satelliittivastaanottimet ja -lähettimet
- Sääasemat ja meteorologiset mittauslaitteet

4 Laitteen suunnittelu, valmistus ja testaus

Tässä osiossa käydään läpi ilmauslaitteen suunnittelua, valmistusta ja testausta. Tarkastellaan erilaisia osa-alueita esimerkiksi rakennetta, ilmanohjausta, sensoreita ja mikrokontrolleria. Suunnittelussa huomioimaan kestävyyttä ja modulaarisuus, Valmistuksessa käytetään 3D-suunnittelua ja 3D-tulostusta. Lopuksi testaus osiossa käydään läpi testauksen tuomia hyötyjä ja arvioidaan mahdollista jatkokehityksen tarvetta.

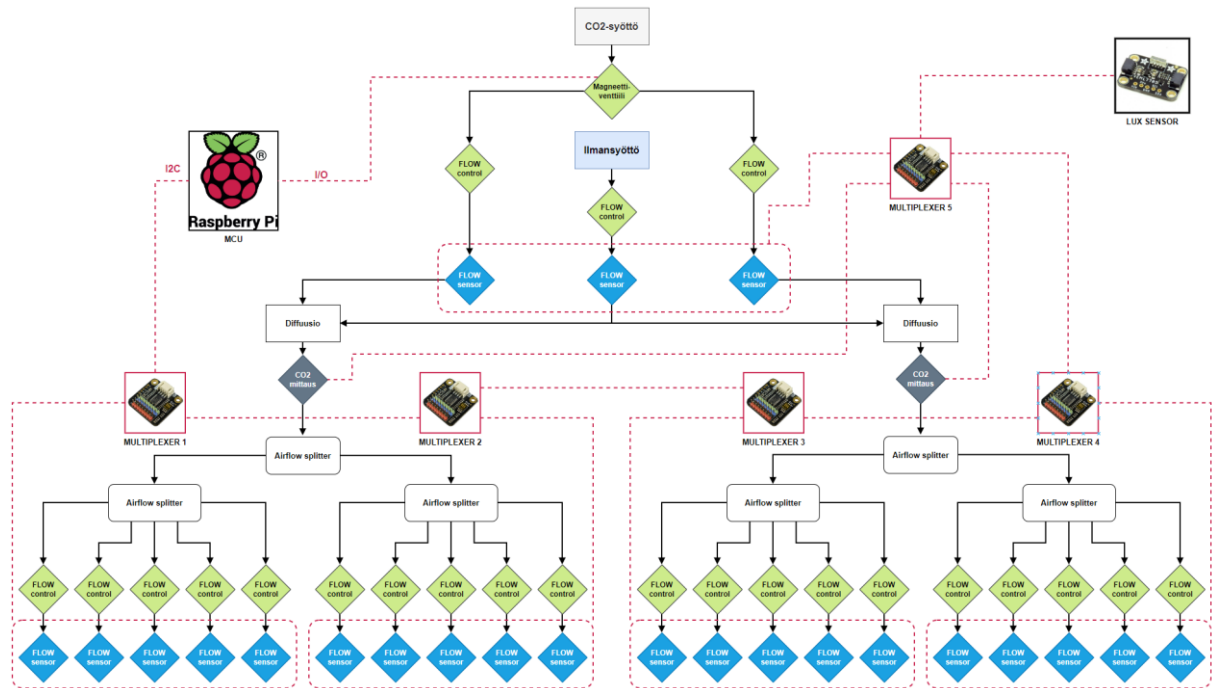
4.1 Suunnittelu

Suunnittelu alkoi tutustumalla erilaisiin tekniikkoihin, komponentteihin ja materiaaleihin. Koska kyseessä on laboratorio laite, niin pitää ottaa huomioon osien kestävyys ja luotettavuus.

Kasvatuskaappiin ei haluta mitään ylimääräisiä bakteereita ja siksi autoklaavin kestämissen tarve tulee materiaaleille silloin, jos mennään sisälle kasvatuskaappiin. Suunnitellessa tämä piti huomioida, jos tällainen tarve tulisi, mutta aika suunnittelun alkuvaiheessa huomasin, että tällaiselle operaatioille ei ole tarvetta itse laitteella. Ainoastaan letkut, joihin puhalletaan säädeltä ilmaa menevät kasvatuskaapin sisälle, tulee siis kestää autoklaavi.

Laitteesta muodostuikin nopeasti kokonaiskuva, josta koostettiin flow chart (kuva2). Laite suunniteltiin modulaariseksi ja siten jatkossa helposti huollettavaksi. Suunnitteluvaiheessa otettiin huomioon mahdollisuus liittää laitteeseen paineilman syöttöjärjestelmä, joka voisi korvata nykyisen akvaariopumpun tulevaisuudessa.

Kuva 2. Laitteen flow chart



4.1.1 Rakenne

Rakenteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon laboratorio-olosuhteet, myös se minne laite tullaan sijoittamaan. Tässä kohteessa laitteelle määriteltä tila sijaitsee kasvatuskaapin vieressä pöydällä. Tila on mitoiltaan rajallinen, joten rakenteen tulee olla kohtuullisen kompakti. Ilmauslaitteen ulostulojen suunnittelussa pitää ottaa huomioon liitettävät letkut ja niiden esteetön reitti kasvatuskaappiin. Ilmasäädöt tulisi sijoittaa niin että niitä on käyttäjän helppo käyttää ja ne tulee olla selkeästä merkitty samoin kuin ulostulot.

4.1.2 Kotelo

Kotelon tulisi tuoda turvallisuutta sen käyttäjälle, se sisältää kuitenkin sähkölaitteita niin sen tulee olla myös sähköturvallinen. Sen materiaali valinnat tulisi olla kestäviä ja helposti muokattavia. Kotelon olisi hyvä sisältää standardi kiinnityspisteitä. Etuna voisi olla, jos kotelo koostuisi erilisistä osista ja olisi täten helposti purettavissa ja muokattavissa. On hyvä, että kotelon sisälle ei ole mahdollista työntää mitään sinne kuulumattomia esineitä. Kotelo suojaa myös johtoja ja liitoksia irtoamiselta ja ylimääräiseltä liikkumiselta. Materiaaliksi voisi käydä lujat muovilaadut, metallit tai puuvalmisteet esimerkiksi vaneri.

4.1.3 Letkut

Laitteella tullaan säätämään ilmavirtauksia, joten on helpoin tapa kuljettaa säädeltyä ilmaa letkuissa tai putkissa. Letkut soveltuvat tässä tapauksessa paremmin, koska laitteen kotelo on suhteellisen pieni ja mutkia tulee paljon. Letkujen on täytettävä tietyt vaatimukset, kuten joustavuus ja pitkäkestoisuus.

Kuva 3. Ilmauslaite kasvatuskaapin vieressä



Laboratorio johon tilaaja tulee laitteen sijoittamaan (kuva 3), on käytetty jo aikaisemmin silikoniletkuja, mutta moni muukin materiaali olisi varmasti toimiva tässä tapauksessa, kun laitteen ei tarvitse kestää autoklaavia. Valinta kohdistui siis silikoniletkuun sen soveltuvien ominaisuuksien vuoksi. Letkun sileä sisäpinta edistää aineiden ja kaasujen sujuvaa virtausta letkussa ja vähentäen näin samalla kontaminaatoriskejä. Joustavuus on merkittävä etu, sillä se helpottaa letkun asennusta ja mahdollisia huolto töitä tulevaisuudessa. Silikoniletkulla on hyvät liitännäisominaisuudet sen joustavuuden vuoksi. Oikein mitoitettuna letku muodostaa

tiivien liitoksen letkukarassa ilman fyysisiä tai kemiallisia apuvälineitä. Näin varmistetaan, että ei tapahdu ilman ohivuotoja ja mittaukset pysyvät tarkkoina ja luotettavina.

Lisäksi monet silikoniletkut täyttävät elintarvikekäyttöön liittyvät standardit, mikä tekee niistä hyvän ja turvallisen valinnan laboratorioihin, joissa saatetaan käsitellä herkkiä materiaaleja tai mahdollisesti jopa elintarvikkeita.

4.1.4 Säätimet

Säätimiä valitessa on otettava huomioon niiden antama tarkkuus. Koska ilmavirtaukset eivät ole suuria, niin on hyvä valita sellaiset säätimet, joissa on iso skaala säätämisessä.

Säätimien tulee olla materiaaliltaan kulutusta kestäviä ja riittävän isoja, jotta niitä on sormilla helppo säätää. Säätimen on hyvä olla vaihdettavissa mahdollisen rikkoutumisen ja huollon vuoksi.

4.1.5 Sensorit

Letkuissa kulkeva ilman määrän mittaamiseen tarvitaan tarkka sensori. Koska FLOW-sensoreita tulee yhteensä 23 kappaletta, on niiden kytkennän, asentamisen, huoltamisen ja vaihtamisen oltava helposti toteutettavissa.

Co₂ pitoisuuden mittaamiseen tarvitaan nopeasti reagoiva sensori, joka menee pieneen tilaan ja jonka kalibrointiväli on riittävän pitkä, jotta laitteella voidaan tehdä kahdenkin viikon mittaaminen ilman, että laite kalibroidaan välissä. Kalibroinnin olisi hyvä toimia automaattisesti tai vähintäänkin helposti kasvatuksen aloitusvaiheessa.

Yö- ja päiväkierto on kasveille luontainen ja se myös tässä laitteessa tulee ottaa huomioon. Co₂ syöttö tulee saada suljettua siksi aikaa, kun kasvatuskaapissa on pimeää ja tämä voitaisiin lukea valoisuus sensorilla kaapin sisältä. Co₂ syöttö voitaisiin katkaista magneettiventtiilin avulla. Sitä voitaisiin ohjata suoraan mikropiirin i/o pinnien avulla esiasetettujen valoisuusraja-arvojen mukaan.

4.1.6 Co2 diffuusio ja ilman jakautuminen

Alusta asti oli selvää, että kaikkia tarvittavia osia ei ole saatavilla valmiina kauppojen hyllyltä. Siksi ne suunniteltava itse ja 3D-suunnitteluohjelma on tähän loistava työkalu, koska suunnitellut osat pystytään helposti tulostamaan 3D-tulostimella.

Suunnitelmissa oli saada kaksi ilmausryhmää kahdella eri hiilidioksidi pitoisuudella. Tämän vuoksi tarvitaan kaksi erillistä koteloa, jossa voidaan rikastaa ilmaa ja mitata hiilidioksidi pitoisuus. Ilmanpaineet eivät tule olemaan suuria, mutta tiivistyksen ne vaativat, jotta ilma ohjautuu oikealla tavalla haluttuun paikkaan.

Molemmista diffuusiokoteloista rikastettu ilma tarvitsee vielä jakaa kymmeneen lähtöön, josta jokaisen ilmavirta mitataan erikseen ennen kuin ne lähtevät laitteesta pois letkuja pitkin kasvatuskaappiin.

Kuva 4. Diffuusiokoteloiden iterointia



4.1.7 Käyttöliittymä ja datan tallennus

Käyttöliittymän tulee olla mahdollisimman reaaliaikainen tiedon suhteen. Sen on hyvä olla helppokäyttöinen ja varmatoiminen, jotta mittaus tulokset tallentuvat koko kasvatusprosessin ajalta.

Käyttöliittymässä tulee näkyä ainakin seuraavat asiat:

- 20kpl ilman säädön sensorin hetkellinen tieto

- Kahden eri syötteen hiilidioksidipitoisuus
- Yö/päivä kierron sen hetkinen tilanne

Datan tallennus voisi tapahtua laitteen fyysiselle muistille kuten muistikortille tai USB-massamuistilaitteelle. Laitteelle jätetään mahdollisuus pilvipalveluun liittämiseen, mutta sen toteutus tässä opinnäytetyössä se on rajattu kokonaan pois.

4.2 Valmistus

Tässä luvussa käsitellään laitteen valmistuksen eri vaiheita ja niiden taustalla olevia ratkaisuja ja valintoja. Aluksi esitellään laitteen ulkoinen rakenne. Tämän jälkeen käsitellään ilmankulun hallintaa ja sen säätämistä. Lopuksi käydään läpi elektroniset komponentit ja datan hallintaan liittyvät asiat. Tavoitteena on tarjota selkeä kuvaus valmistusprosessista, jotka vaikuttavat laitteen toimintaan ja suorituskykyyn.

4.2.1 Kotelo

Koteloksi valittiin käytöstä poistettu Fanatic-merkkinen tietokonekotelo (kuva 5). Koteloon suunniteltiin ja tulostettiin PLA-filamentista uusi etulevy, johon asennettiin 20 kpl MS UK 1/4 x 6 letkukara-liitintä. Letkukaraliittimille tehtiin vastakierteet tulostettuun etulevyyn, ja asennusvaiheessa liitos tiivistettiin EPOX-liimalla. Myös kotelon 5.25 etulevyt tulostettiin uudestaan, ja etulevyyn tehtiin paikat kolmelle EAS2000-F02 vastavirtausventtiilille, joilla säädetään kokonaisilman virtausta sekä kahta erillistä CO₂-virtausta.

Kuva 5. Ilmauslaite kasattuna



Kuva 6. Suunniteltu ja 3d-tulostettu etulevy

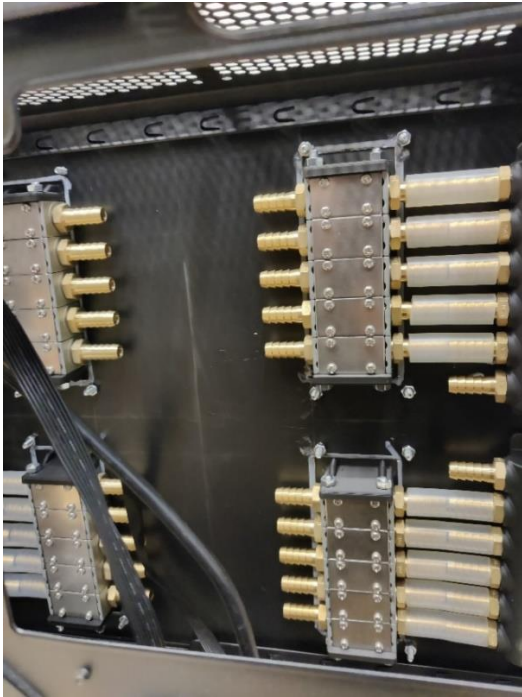


Kotelon kylkeen leikattiin kulmahiomakoneella neljä reikää, joihin jokaiseen reikään tulostettiin sovite viidelle EAS2000-F02 vastavirtausventtiilille (kuva 7). Säästöventtiileille tulostettiin sormisäädölle sopivat nappulat. Tämä toimii laitteen kantena, jota ei ole tarkoitus irrottaa kotelosta, vaan kaikki tarvittava huolto tehdään kotelon toiselta puolelta eli pohjasta. Kotelon takaosaan tulostettiin umpinainen IO-shield ja virtalähde paikkaan sopiva peitelevy tukkimaan pääsyn laitteen sisäosiin.

Kuva 7. Säästöpaneelien asennus



Kuva 8. Säästöventtiilit laitteen sisältäpäin



4.2.2 Diffuusiokotelo

Diffuusiokotelo suunniteltiin ja valmistettiin 3D-tulostamalla PLA-filamentista. Se on kaksiosainen ja osat kiinnittyvät toisiinsa kierteiden avulla, jonka liitos on tiivistetty PTFE teipillä. Sen letkulähdöt ovat messinkiset letkukarat MS UK 1/4 x 10, jotka ovat kiinnitetty kiertämällä kierteille ja kierteissä on EPOX-liimaa tiivistäineena.

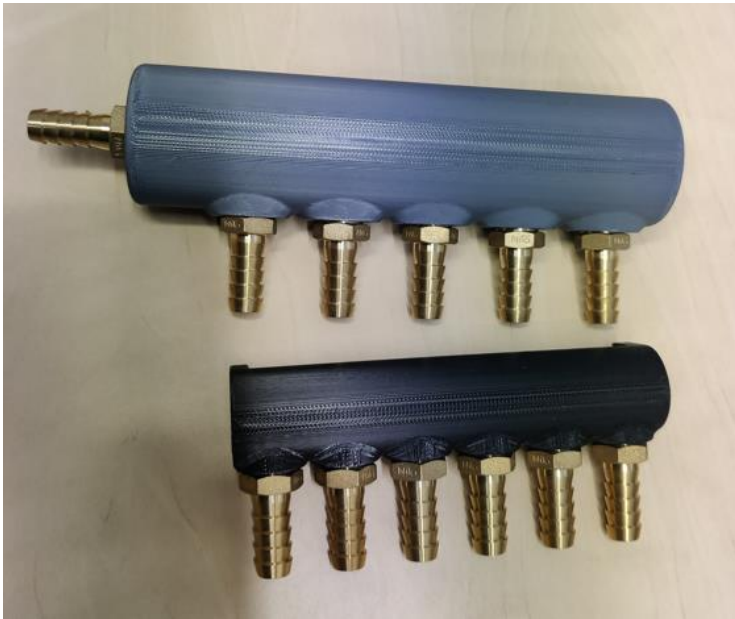
Kuva 9. Lopullinen diffuusiokotelo



4.2.3 Jakoblokki

Jakoblokki on valmistettu 3D-tulostamalla PLA-filamentista. Se on yksiosainen ja siihen on kierretty kuusi kappaletta messinkisiä letkukaroja MS UK 1/4 x 10. Letkukarojen kierrelitokset ovat tiivistetty EPOX-liimalla

Kuva 10. Jakoblokki 1:6, versio 1 (harmaa) ja versio 2 (musta)



4.2.4 Ilmankulku laitteessa

Kotelon sisällä ilma kulkee 10 mm sisähalkaisijaltaan olevissa silikoniletkuissa. Niiden liitokset letkukaroihin on tiivistetty nestemäisellä kumilla. Kokonaisilman syötössä on säädin, jolla voi rajoittaa kokonaisilmanvirtausta. Kun taas hiilidioksidisyöttö jaetaan ensin kahteen lähtöön kotelon sisällä ja säädöt ovat vasta jaon jälkeen, tähän syynä on se että voidaan säätää kahta eri pitoisuuksista ilmaa kasvatusalustoille.

4.2.5 Säätimet

Ilman kulun säätimenä käytettiin EAS2000-F02 vastusvastaventtiileitä. Ne on sijoitettu laitteen yläpintaan siten, että jokaisessa ryhmässä on viisi säädintä ja ryhmiä on yhteensä neljä. Lisäksi on kolme liitintä, jotka on sijoitettu laitteen etuosaan, ja yksi niistä on kokonaisilman säätö ja kaksi muuta ovat kahden eri ryhmän hiilidioksidipitoisuuden lisäsäädöt.

Kuva 11. EAS2000-F02 vastusvastaventtiilit

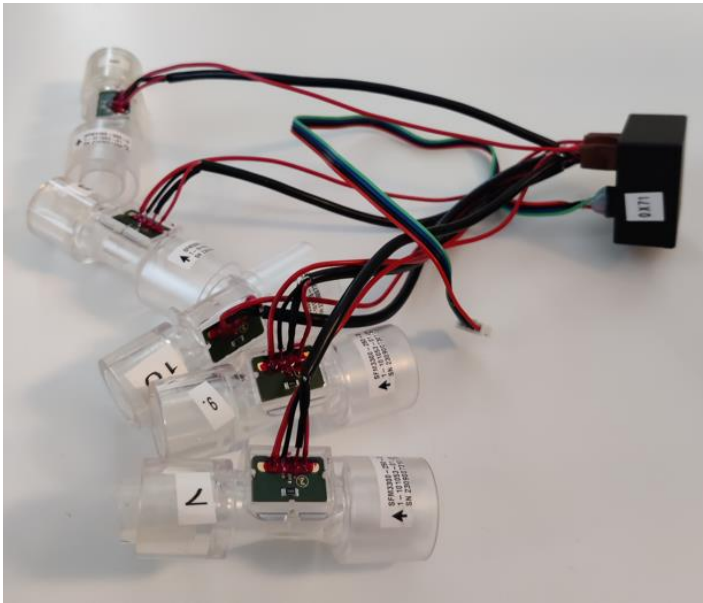


4.2.6 Mikro-ohjain

Laitteen mikro-ohjaimena toimii Raspberry Pi 4 2GB. Sen I2C väylään on kytketty neljä multiplekseriä, joiden osoitteet ovat 0x70-0x73. Virran jakona toimii pinnit 4(5 v) ja 6(GND). Lisäksi IO17 pinni toimii magneettiventtiilin ohjausvirtana. Mikro-ohjaimelle on tulostettu suojakotelo PLA-filamentista.

Projektissa päädyttiin käyttämään Raspberry Pi:tä sen monipuolisten liitettävyyksien vuoksi. Toisin kuin esimerkiksi Arduino Uno tai ESP32, Raspberry Pi:ssä on suora HDMI-liitäntä. Tässä projektissa HDMI-liitäntä mahdollistaa ulkoisen näytön liittämisen laitteeseen ja tällä tavalla saadaan reaaliaikaiset tiedot näytölle.

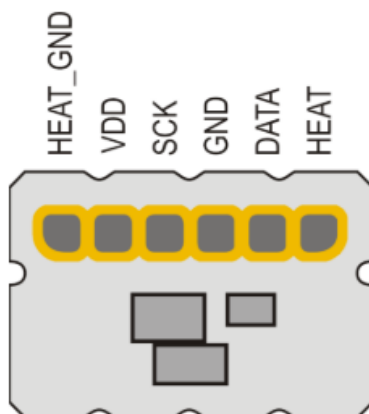
Kuva 14. Multiplexerissä kiinni viisi FLOW-sensoria



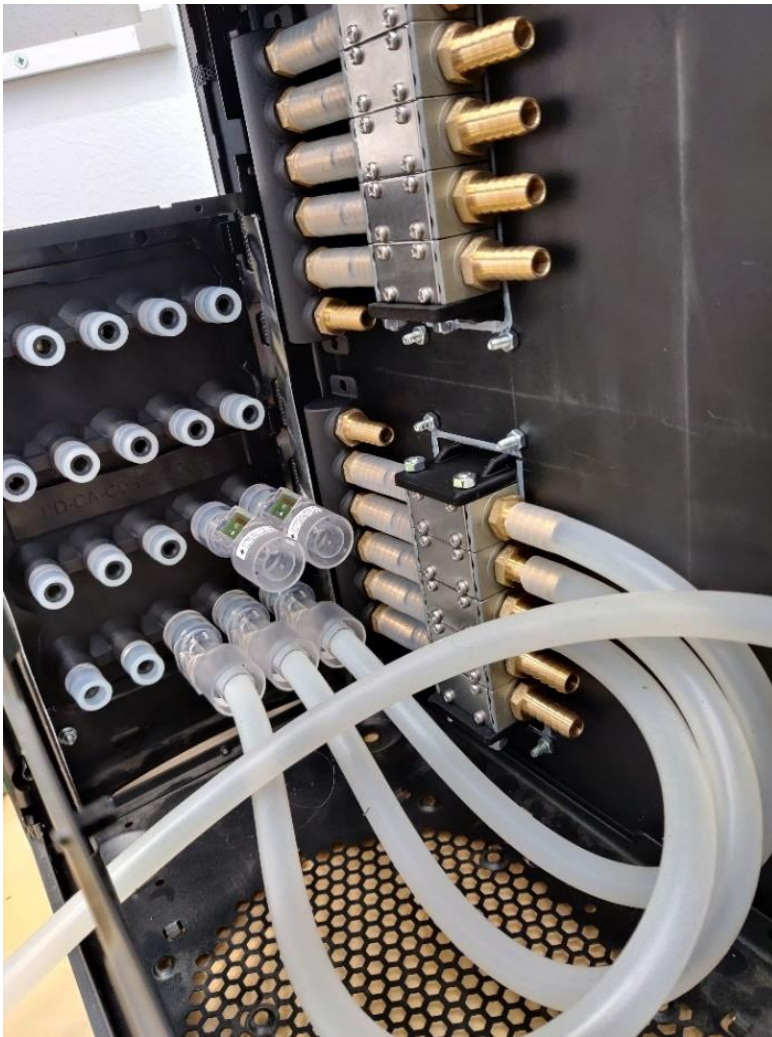
4.2.7 Sensorit

FLOW-sensoreita on yhteensä 23 kpl ja ne ovat Sensirionin valmistamia ja niiden malli on SFM3300-D. Johdot liitettiin sensoreihin juottamalla ja toiseen päähän juotettiin nelirivinen SAMTEC SSW-104-02-G-S-RA liitin. Kytkeäntäjohtona käytettiin kaksinapaista ympäripunottua johtoa, johon kytkettiin SCK sekä DATA ja punottuun suojakuoreen kytkettiin GND. VDD:lle vedettiin erillinen johto, joka liitettiin myös samaan neliriviseen liittimeen. Nelirivinen liitin on suoraan sopiva multiplexerille ja järjestys johdoissa otettiin huomioon multiplexeristä.

Kuva 15. FLOW-sensorin kytkentä

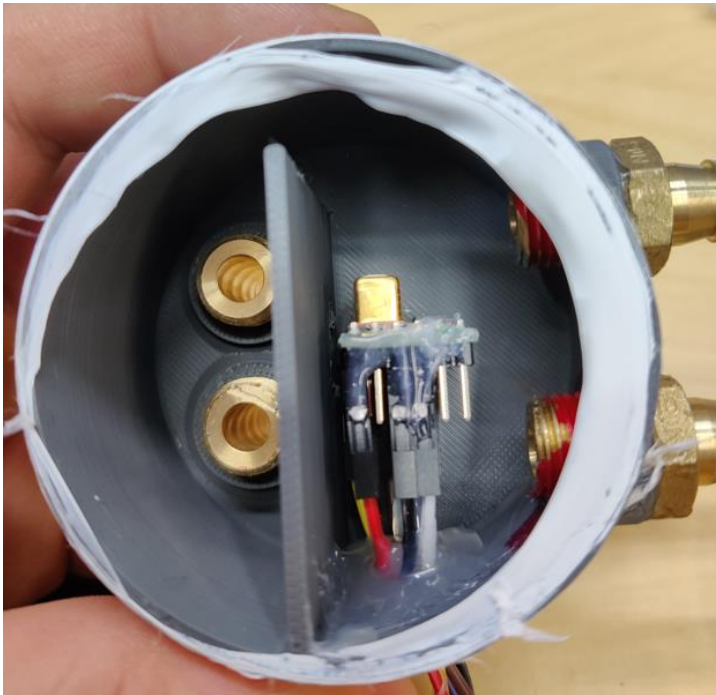


Kuva 16. FLOW-sensorit asennettuna etulevyyn



Hiilidioksidisensoreita on 2 kappaletta ja ne ovat Infineonin valmistamat ja niiden malli on EVALPASCO2MINIBOARDOBO1. Sensorit liimattiin diffuusiokotelon sisälle ja johdot tuotiin ulos 7 mm reiästä, joka tiivistettiin kuumaliimalla. Hiilidioksidisensoreissa törmättiin ilmeisesti yhteensopivuusongelmaan multipleksereiden suhteen. Yksittäin kytkettynä sensoreista saatiin CO₂-tieto ulos laitteesta, mutta multiplekserin kanssa ne eivät toimineet. Asiaan ei löydetty täysin varmaa ongelmaa, mutta epäiltiin, että kyseessä on melko todennäköisesti ”ground loop” -ongelma. Sensorit saatiin toimimaan ESP32-mikropiirin kanssa ja niiden toiminta pystyttiin toteamaan.

Kuva 17. PAS-sensori asennettuna

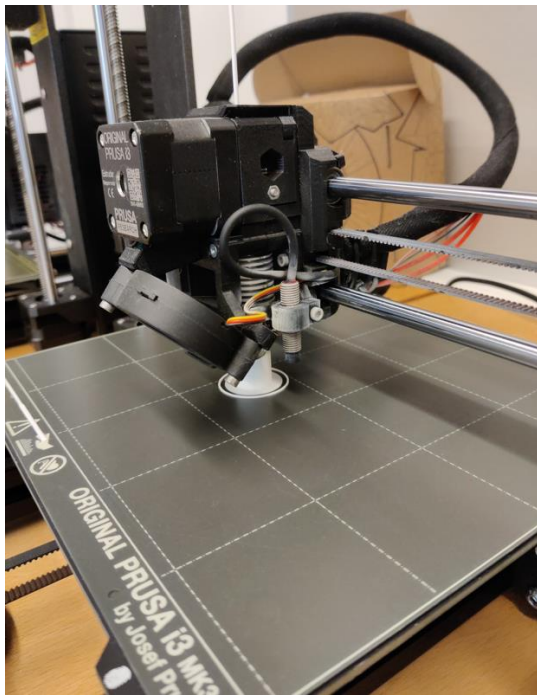


Yö/päivä tulkinta toteutettiin valoisuusanturilla. Anturilla tulkitaan, ovatko kasvatускаapissa kasvatusvalot päällä vai ei. Koska kasvatuksen aikana yö- ja päiväajat määritetään kasvattajan toimesta, ne eivät välttämättä liity todelliseen päivärytmiin.

4.2.8 3D-tulostus ja suunnittelu

Kaikki tulostetut osat on suunniteltu käyttäen Autodeskin Fusion 360 -ohjelmaa ja tulostettu Forssassa HAMK:in Prusa i3MK3 ja Bambulab x1 carbon tulostimilla. Tulostusmateriaalina on käytetty polylaktidia (PLA) ja täyttöasteena (infill) on käytetty 100 %. Joitain alustavia testiosia tulostettiin aluksi 40 % täytöllä, jotta osien fyysinen sopivuus voitiin varmistaa ja tulostusmateriaalia pystyttiin täten säästämään.

Kuva 18. Prusa i3 MK3 tulostin



Kuva 19. Bambulab x1 carbon tulostin



4.3 Esitestaus

Esitestausvaiheen tarkoituksena on varmistaa, että laitteen eri komponentit ja toiminnot toimivat odotetulla tavalla ennen lopullista valmistumista. Tässä on kuvaus tarkasteltavista asioista esitestauksessa:

1. Järjestelmän tiiveys
 - Tarkistetaan silmämääräisesti, ettei vuotoja ole näkyvissä
2. Ilmavirran säätimien toiminnan tarkastus
 - Tarkistetaan että säätimet toimivat oikein
3. 3D-tulostettujen osien toiminta
 - Testataan että ilma ohjautuu suunnitellusti tulostetuissa komponenteissa
4. Mikro-ohjaimen ja sensoreiden toiminta
 - Testataan mikro-ohjaimen ohjelmisto ja sen kyky suorittaa laitteen tarvitsemia toimintoja
 - Varmennetaan sensoreiden tarkkuus ja luotettavuus

Esitestauksen tuloksena saadut tiedot mahdollistavat ongelmien tunnistamisen ja tarvittavien muutosten tekemisen ennen kuin laite etenee lopulliseen käyttäjätestaukseen. Tällä testillä varmistetaan, että lopullinen tuote täyttää asetetut vaatimukset ja vastaa käyttäjien odotuksia.

4.3.1 Testausympäristö

Esitestaus suoritettiin maaliskuussa 2023 Forssan kampuksen laboratoriotiloissa, ja testausolosuhteet pysyivät suhteellisen tasaisina koko testausjakson ajan. Huoneessa oli toimiva ilmanvaihto, mikä mahdollisti sen, että ympäristötekijät eivät olennaisesti vaikuttaneet tuloksiin, varmistaen siten testien luotettavuuden ja tehokkuuden.

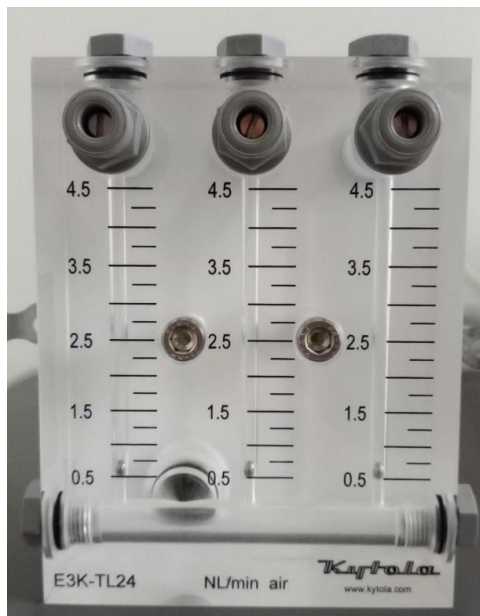
4.3.2 Testauksen toteutus

Ilmavirran mittaus- ja kalibrointiprosessi alkaa, kun laitteeseen liitetään kompressorin, joka toimii ilman lähteenä. Kompressorin ulostuloilman määrä säädetään tarpeen mukaan kompressorin omalla paineen säätimellä. Tämän jälkeen suoritetaan systemaattinen tarkistus jokaisen FLOW-anturin osalta. Kunkin anturin ja säätimen toiminta tarkastetaan ja

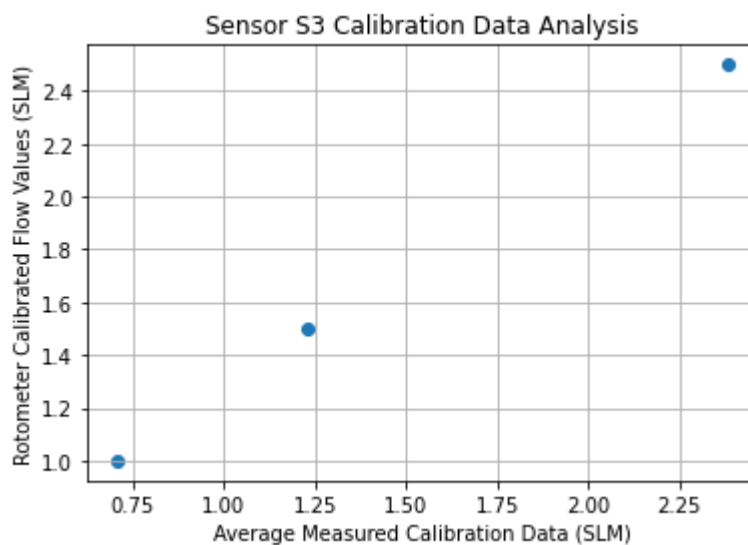
tarvittaessa kalibroidaan yksitellen, jotta varmistetaan tarkan ja luotettavan ilmavirtamittauksen saavuttaminen.

Laitteen ulostuloon on liitetty yksi kerrallaan rotametri Kytola E3K-TL24, jonka avulla voidaan mitata ulostulevan ilmavirran määrää. Tämän mittalaitteen avulla suoritetaan FLOW-anturien kalibrointi, mikä tarkoittaa, että jokainen anturi kalibroidaan vastaamaan rotametrin antamia tuloksia mahdollisimman tarkasti. Jokaiselle anturille tehdään kolme eri mittausta jokainen eri virtausnopeudella 0,5SLM, 1,5SLM ja 2,5SLM.

Kuva 20. Rotametri Kytola E3K-TL24



Kuva 21 Testi tulos analyysi



Python-ohjelmoinnilla tehty testausohjelma, jossa arvot luetaan 10 sekunnin ajan ja tallennetaan sensorilta saadut arvot CSV-tiedostoon. Testausohjelmaan annetaan anturin numero ja jokaisen testin haluttu SLM-arvo. Näin saadaan yksilöllinen tiedostonimi, joka on helppo tunnistaa jälkikäteen. Esimerkiksi tiedostonimi voi olla S1_T10.csv, jossa S1 viittaa sensorin numeroon 1 ja T10 merkitsee 1.0 SLM -testiä.

Esitestauksessa havaittiin, että sensoreilta saadut arvot heittelivät oletettua enemmän. Tämä johtui ainakin osittain ilman ohivuodoista. Järjestelmän tiiveys tulisi vielä tarkastaa ja parantaa tiiveyttä liimaamalla letkujen liitokset. Testissä käytetty rotametri osoittautui myös melko huonoksi valinnaksi tähän testiin, sillä sen asteikko oli silmämääräisesti luettava ja rotametrin kohta 1,5SLM osoittautui hankalaksi säädettäväksi ilmeisesti rotametrin rakenteellisen syyn vuoksi. Kaikki sensorit ja säätimet osoittautuivat testissä toimiviksi, ja testi saatiin suoritettua loppuun asti odotetulla tavalla.

4.4 Lopputestaus

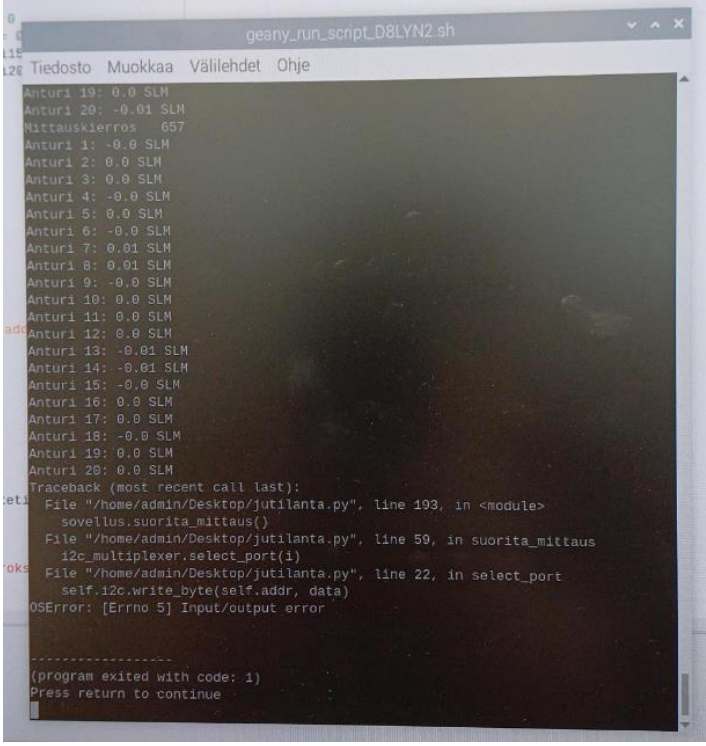
Lopputestaus oli tarkoitus suorittaa Hämeenlinnassa Visamäen HAMK:in kampuksella. Yksi kasvatusera tehtäisiin laitteen avulla, ja tästä saadusta datasta tehtäisiin loppupäätelmä. Testauksen suorittaisi laitteen tilaaja. Laitteen toimitusajankohtana, paikan päällä tulleen teknisen vian seurauksena testausajankohta jouduttiin siirtämään myöhemmäksi. Myös ohjelmistossa huomattiin tällöin ongelmia, jotka tulisi korjata ennen testin aloittamista.

Kuva 22. Ilmauslaite testausympäristössä



Tekninen ongelma saatiin korjattua, mutta ohjelmistokehityksessä tuli odottamattomia ongelmia vastaan, joiden korjaamiseen tämän opinnäytetyön resurssit eivät enää riittäneet. Säättö- ja mittausohjelmisto toimivat, mutta pidemmän ajan testissä ohjelmistot pysähtyivät ja datan tallennus katkeaa. Tässä olisi selkeästi uuden opinnäytetyön mahdollisuus jatkokehityksen kannalta.

Kuva 23. Ohjelma pysähtynyt 657 mittauskierroksen jälkeen



```

geany_run_script_D8LYN2.sh
Tiedosto Muokkaa Väliohjel Ohje
Anturi 19: 0.0 SLM
Anturi 20: -0.01 SLM
Mittauskierros 657
Anturi 1: -0.0 SLM
Anturi 2: 0.0 SLM
Anturi 3: 0.0 SLM
Anturi 4: -0.0 SLM
Anturi 5: 0.0 SLM
Anturi 6: -0.0 SLM
Anturi 7: 0.01 SLM
Anturi 8: 0.01 SLM
Anturi 9: -0.0 SLM
Anturi 10: 0.0 SLM
Anturi 11: 0.0 SLM
Anturi 12: 0.0 SLM
Anturi 13: -0.01 SLM
Anturi 14: -0.01 SLM
Anturi 15: -0.0 SLM
Anturi 16: 0.0 SLM
Anturi 17: 0.0 SLM
Anturi 18: -0.0 SLM
Anturi 19: 0.0 SLM
Anturi 20: 0.0 SLM
Traceback (most recent call last):
  File "/home/admin/Desktop/jutilanta.py", line 193, in <module>
    sovellus.suorita_mittaus()
  File "/home/admin/Desktop/jutilanta.py", line 59, in suorita_mittaus
    i2c_mux.select_port(1)
  File "/home/admin/Desktop/jutilanta.py", line 22, in select_port
    self.i2c.write_byte(self.addr, data)
OSError: [Errno 5] Input/output error

(program exited with code: 1)
Press return to continue
  
```

Ohjelmiston kaatuminen tapahtuu sattumanvaraisesti, esimerkiksi ohjelmistoon luodun mittauskierroslaskurin perusteella ongelma ilmeni jopa ensimmäisten 20 kierroksen aikana, kun taas välillä ohjelmisto toimi useamman tunnin ja päästiin yli 700:aan mittauskierrokseen.

Kyseistä ongelmaa yritettiin korjata monin eri tavoin. Koodia yksinkertaistettiin merkittävästi siten, että SMBus-väylä nollattiin useissa eri kohdissa ja multiplekserit sammutettiin aina ennen seuraavan multiplekserin lukemista ja käynnistettiin uudelleen. Kun multiplekseriin kytketyt anturit oli luettu, multiplekserin portit nollattiin lähettämällä portin 8 komento. Lisäksi kaikki tiedot käsiteltiin omissa muuttujissaan taulukkorakenteiden sijaan, mikä teki koodista selkeämpää ja helpommin hallittavaa.

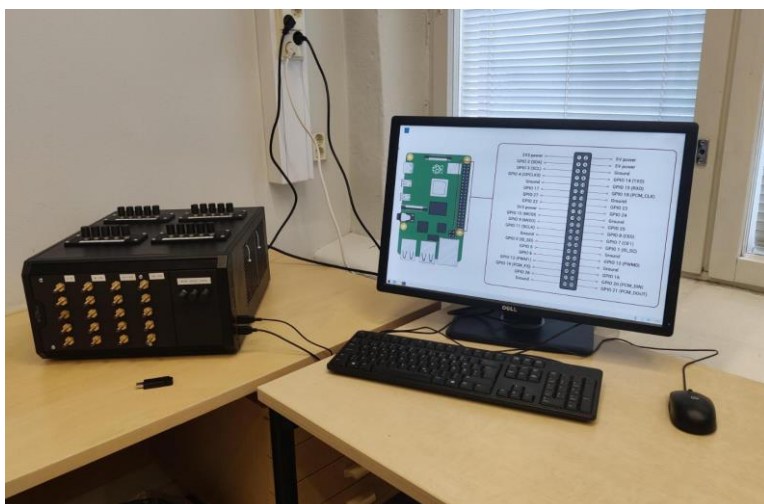
5 Johtopäätökset ja pohdinta

Vaikka resurssien puitteissa emme aivan päässeet tavoitteeseen, tuo opinnäytetyönä kehitetty laite monia hyötyjä tilaajalle. Laitteessa toimivat kaikki 20 kappaletta ilmansäätöjä erillisille lähdöille ja hiilidioksidin sekoitus, koska nämä ominaisuudet eivät tarvitse sähköä on laite sinänsä käyttövalmis. Laitteen ilmavirtojen mittaaminen ja hiilidioksidipitoisuuksien mittaaminen toimii, mutta ohjelmisto tarvitsee jatkokehitystä. Laitteen rakenne on kestävä ja turvallinen. Laitteen käyttäjäystävällisyys on otettu huomioon, säätimet ja lähdöt ovat numeroituja, letkuliittimet on tuotu käyttäjälle helposti saataville.

Jos laitteessa käytettäisiin yhden mikro-ohjaimen sijasta useampaa mikro-ohjainta ja tiedot kerättäisiin sitä kautta esimerkiksi suoraan tietokoneelle tai pilvipalveluun, mahdollisesti päästäisiin parempaan lopputulokseen. Esimerkiksi jokainen ryhmä voisi olla kytketty erilliseen esp32 ohjaimeen ja tällä tavalla saataisiin yhteensä kuusi toisistaan riippumatonta mittausyksikköä. Toteutus vaiheessa riittäisi yhden yksikön suunnittelu ja sitä kautta muut olisi mahdollista monistaa.

Sensorit toimivat mielestäni hyvin ja olivat riittävän tarkkoja käyttötarkoitukseen nähden. Ilman i2c väylän temppuilua näiden toimintaan saattaminen olisi ollut huomattavasti helpompaa. Rakennus vaiheessa sain hyvin nopeasti yhden ja useammankin sensorin toimimaan ohjelmallisesti. Ongelmat alkoivat, kun multipleksereitä liitettiin neljä samaan i2c-väylään ja jokaisessa oli kytkettynä viisi FLOW-sensoria. Kun jokainen anturi luettiin kymmenen kertaa, syntyi koodissa silmukka, joka käytiin yhteensä 200 kertaa läpi yhden mittaus kierroksen aika ja tämä tukotti ilmeisesti Raspberryn i2c väylän.

Kuva 24. Lopullinen kuva laitteesta



Lähteet

Autoklaavit. (n.d.). Penli. Retrieved 6 May 2024. <https://www.penli.fi/category/122/autoklaavit>

Farnell. (2022). Global IoT Trends 2022. <https://uk.farnell.com/global-iot-trends-2022>

Farnell. (2022). Global IoT Trends 2022 [kuva 1]. <https://uk.farnell.com/global-iot-trends-2022>

Kotilainen, S. (2024, May 19). Ensimmäinen tietokone täytti 60 vuotta. Tivi.

<https://www.tivi.fi/uutiset/ensimmainen-tietokone-taytti-60-vuotta/691d6304-40e9-3dde-9eee-5a85521f75e5>

Nielsen, T. J. 21 03 24-N., & clipboard, N.-P. G. B. U. copied to. (2024, March 21).

Salaperäinen laitos paljastaa unohdettua roomalaista teknologiaa. Historia.

<https://historianet.fi/sivilisaatiot/rooman-valtakunta/rooman-valtava-mylly-oli-1-400-vuotta-aikaansa-edella>

Raspberry Pi Documentation. (n.d.). Www.raspberrypi.com.

<https://www.raspberrypi.com/documentation/>

Raspberry pi foundation – about us. (2024, May 23). Raspberry Pi Foundation.

<https://www.raspberrypi.org/about/>

Liite 1. Liitteen otsikko

Liite 2. Liitteen otsikko