



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jesse Haataja

Hiukkaslaskurin ohjauselektroniikan toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

17.05.2019

| | |
|---|--|
| Tekijä Otsikko | Jesse Haataja Hiukkaslaskurin ohjauselektroniiikan toteutus |
| Sivumäärä Aika | 28 sivua 17.05.2019 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma | Sähkö- ja automaatiotekniikka |
| Ammatillinen pääaine | Sähkövoimatekniikka |
| Ohjaajat | Lehtori Janne Mäntykoski Dosentti Juha Kangasluoma |
| <p>Työ tehtiin Helsingin yliopiston ilmakehätieteiden tutkimuskeskukselle.</p> <p>Insinööriyön tavoitteena oli toteuttaa hiukkaslaskuriin sen ohjauselektroniiikan sisältävät piirilevyt. Ohjauselektroniiikasta oli ennen työn aloitusta jo toimiva prototyyppi, jonka toiminnallisuudet tuli hioa loppuun. Prototyypin pohjalta tuli valmistaa aiempaa kompaktimpi kokonaisuus. Ohjauksen perustana käytettiin Raspberry Pi -pienoistietokonetta, jonka päälle uusien piirilevyjen tuli olla liitettävissä.</p> <p>Raspberry Pi kykenee käsittelemään ainoastaan digitaalisia signaaleita, joten piirilevyn tuli sisältää vaadittavat ominaisuudet analogisten antureiden lukemista varten. Piirilevyn tuli myös kyetä ohjaamaan hiukkaslaskurissa käytettyjä toimilaitteita ja säätämään niitä.</p> <p>Lopputuotteena työssä saatiin kaksikerroksinen Raspberry Pi:n päälle sopiva piirilevykokonaisuus, joka sisälsi kaiken hiukkaslaskurin ohjaukseen vaadittavan elektroniiikan. Kokonaisuus oli pääosin onnistunut ja toimiva, yhtä komponenttivalintaa lukuun ottamatta. Toimilaitteiden ohjauksessa käytetyt staattiset releet eivät toimineet halutulla tavalla niiden lämpötilan noustessa normaaliin käyttölämpötilaan. Releet ovat helposti vaihdettavissa ja ne korvattiinkin uusilla käyttöön paremmin soveltuvilla malleilla.</p> | |
| Avainsanat | hiukkaset, laskuri, piirilevy, elektroniiikka, raspberry pi |

| | |
|--|---|
| Author Title | Jesse Haataja Implementation of particle counter control electronics |
| Number of Pages Date | 28 pages 17 May 2019 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical and Automation Engineering |
| Professional Major | Electrical power engineering |
| Instructors | Janne Mäntykoski, Senior Lecturer Juha Kangasluoma, Docent |
| <p>This work was carried out for the Institute for atmospheric and earth systems research at University of Helsinki.</p> <p>The aim of this work was to implement a circuitry for control electronics to a particle counter. Control electronics were on prototype stage and a working prototype was already in existence. Idea was to refine the functionalities of the prototype and to make a more compact sized unit. Controlling the functions of the electronics was made using Raspberry Pi -mini-computer and the control electronics circuit board had to be made so that it fits on top of the Raspberry Pi.</p> <p>Raspberry Pi can only handle digital signals, so the control circuit had to include features to convert analog signals from sensors to a digital format. Also, all the actuators that were needed for the particle counter to work had to be made controllable by Raspberry Pi.</p> <p>The outcome of this work is a control circuit consisting of two printed circuit boards that fit on top of Raspberry Pi. The control circuits main functions worked properly, except for one fault in chosen components. Solid state relays controlling the actuators did not perform as expected when they heated to their nominal temperature. Relays were easily changeable, and they were replaced with a different model more suitable for the use.</p> | |
| Keywords | particles, counter, PCB, electronics, raspberry pi |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Hiukkaslaskuri | 2 |
| 2.1 | Optinen hiukkaslaskuri | 2 |
| 2.2 | Kondensaatiotekniikka | 3 |
| 3 | Prosessin ohjaus | 5 |
| 3.1 | Kaasun virtaaman mittaus | 5 |
| 3.2 | Peltier-jäähdytyslementti | 6 |
| 3.3 | Kaasupumppu | 7 |
| 3.4 | PID-säätö | 8 |
| 3.5 | Pulssinleveysmodulaatio (PWM) | 10 |
| 4 | Prosessin ohjauksen toteutus | 12 |
| 4.1 | Raspberry Pi | 12 |
| 4.2 | Mittausprosessi | 13 |
| 4.3 | Anturit ja vaaditut ADC-muuntimet | 15 |
| 4.4 | Toimilaitteet | 17 |
| 5 | Piirilevyjen toteutus | 19 |
| 5.1 | Piirilevyiltä vaaditut ominaisuudet | 19 |
| 5.2 | Piirilevyjen suunnittelu | 19 |
| 5.3 | Piirilevyjen valmistus | 21 |
| 5.4 | Suunnitteluohjelmisto | 23 |
| 5.5 | Piirilevyjen testaus | 23 |
| 6 | Yhteenveto | 26 |
| | Lähteet | 27 |

Lyhenteet

| | |
|-----|---|
| ADC | Analog to digital converter. Analogi-digitaali-muunnin. Muuntaa analogisen signaalin digitaaliseksi. |
| CPC | Condensation particle counter. Kondensaatioydinlaskuri. Kondenssaatioon perustuva mittalaite, jolla mitataan aerosolin sisältämän hiukkasten määrä. |
| OPC | Optical particle counter. Optinen hiukkaslaskuri. Laserlaskuri, joka havaitsee hiukkasten säröttämän valon ja tuottaa tämän pohjalta jännitepulsseja. |

1 Johdanto

Insinööriyön tilaajana toimi Helsingin yliopiston ilmakehätieteiden keskus INAR, joka tekee tutkimusta erityisesti ilmastonmuutoksen, ilmanlaadun, biokemiallisten kiertojen ja ekosysteemiprosessien parissa. Keskuksen tavoitteena on tuottaa korkeatasoista tutkimustietoa ilmakehästä ja ympäristöstä yhteiskunnan käyttöön niin kansallisesti, kuin kansainvälisestikin. (1).

Työ tehtiin osana hiukkaslaskurin tuotekehitysprosessia ja sen pääasiallisena tavoitteena oli toteuttaa kehitettävään hiukkaslaskuriin laitteen ohjauselektronikan sisältävä piirilevy. Työn pohjalla oli toiminnallisuuksiltaan valmis prototyyppi, johon tehtiin työn edetessä enää pieniä muutoksia. Työhön kuului myös valmiin piirilevyn testaaminen ja sen toiminnallisuuksien varmistaminen.

Tuotekehityksen tavoitteena oli kehittää markkinoilla saatavilla olevia mittalaitteita kompaktimpi, halvempi ja huoltovapaampi versio, johon voidaan tarvittaessa liittää helposti lisäominaisuuksia, kuten GPS- ja mobiilidatayhteydet. Mittalaitetta valmistetaan muutamia kappaleita, joten piirilevy tuli suunnitella mahdollisimman helposti ymmärrettäväksi mahdollista tulevaa "sarjatuotantoa" ajatellen.

CPC eli kondensaatioydinlaskuri on hiukkaslaskuri, joka voidaan toteuttaa useammalla eri tekniikalla. Tämän työn käsittelemä hiukkaslaskuri perustuu konduktiiviseen jäähdytykseen.

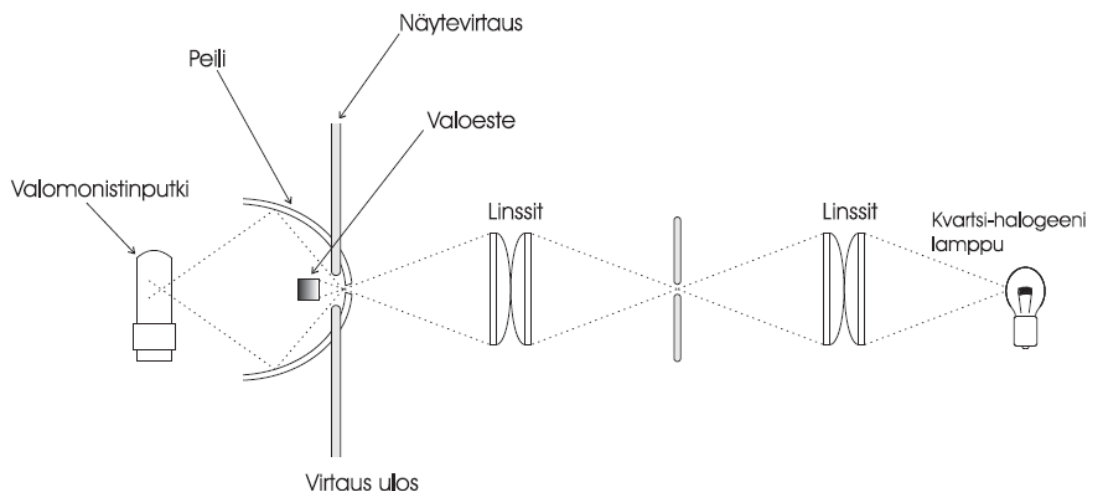
2 Hiukkaslaskuri

Hiukkasten mittaus

Mitattavana suureena hiukkaslaskurissa toimii aerosolin sisältämät hiukkaset. Aerosolin, eli kiinteitä hiukkasia sisältävän kaasun tutkiminen on kasvanut voimakkaasti viime vuosikymmeninä. 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla niiden mittaukset liittyivät ensisijaisesti likaisten työympäristöjen ilmanlaadun määrittämiseen. 1900-luvun loppupuoliskolla ilmakehän aerosolien vaikutukset ulkoilman laatuun ja sitä kautta ihmisten terveyteen on entisestään herättänyt kiinnostusta niiden mittaukseen. Viime vuosina mittauksia on sovellettu mm. aerosolin ilmastovaikutusten selvittämisessä. Myös puhtaan sisäilman ja epäpuhtauksista vapaiden puhdistilojen tuottaminen ja valvominen on kehittänyt tutkimusta eteenpäin. (2, s. 12–13.)

2.1 Optinen hiukkaslaskuri

Hiukkaset havaitaan optista hiukkasen sirottamaan valoon perustuvaa menetelmää käyttäen, jossa aerosolinäyte virtaa OPC (Optical Particle Counter) -laskurin läpi. Kuvassa 1 on esitetty yhden tyyppisen optisen laskurin rakenne. Näyte virtaa putkea pitkin laskurin sisään, jossa se kulkee laskurissa sijaitsevan laserin, tai muun valonlähteen läpi.



Kuva 1. Optisen laskurin toimintaperiaate (2, s. 38).

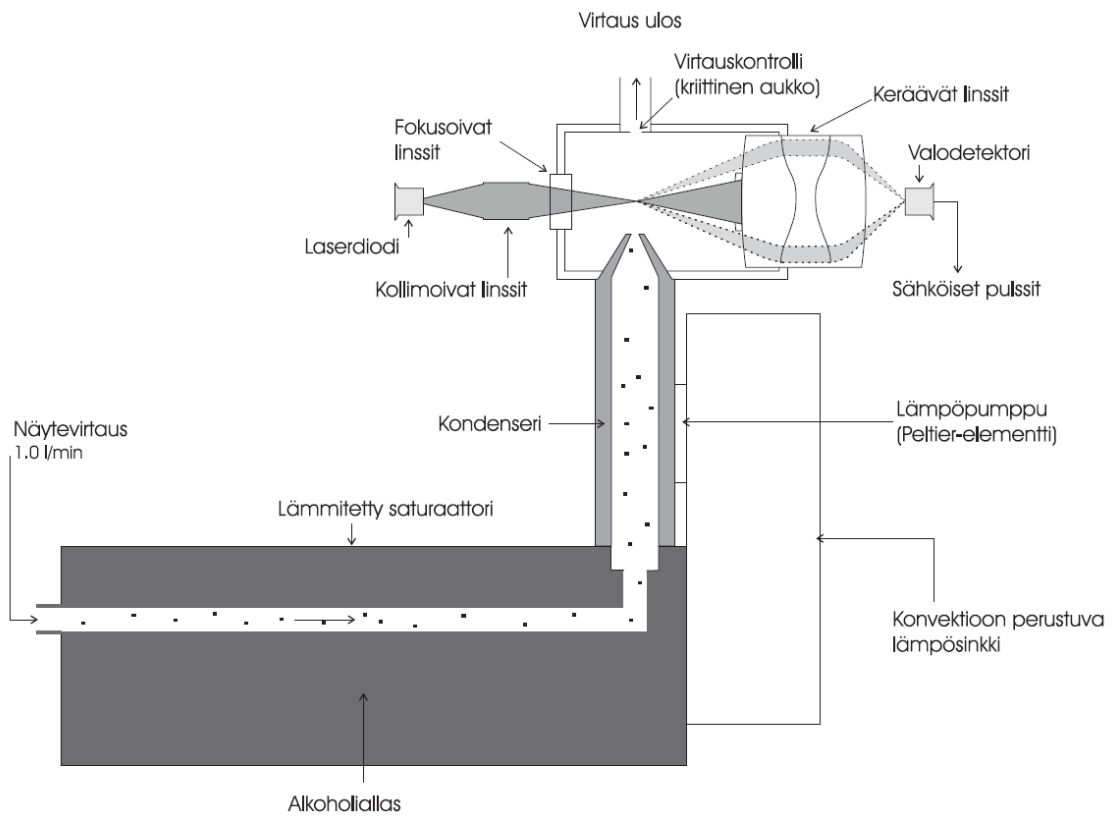
Ohueksi seinämäksi useammalla linssillä kohdistettu valo sijaitsee mittauskammiossa heti näytevirtausta kuljettavan putken ulkopuolella. Kun hiukkanen osuu valoseinämään, valoa siroaa valoesteen ohi, josta se peilein heijastetaan valoilmaisimelle. Laskuri voidaan myös toteuttaa sijoittamalla valoilmaisin näytevirtauksen kanssa samalle linjalle, mutta eri tasoon. Nykyään valo tuotetaan usein laserdiodin avulla ja valoilmaisimena käytetään valolle herkkää fotodiodia.

Mittauksen perustuessa valon sirontaan rajoittuu havaittavan hiukkasen minimikoko käytetyn valon aallonpituuteen. Jotta näkyvää valoa pienempiä hiukkasia voidaan havaita myös optisella sirontamenetelmällä, tulee hiukkaset suurentaa ennen OPC-laskuria. (2, s. 36–38.)

2.2 Kondensaatiotekniikka

CPC eli condensation particle counter eli kondensaatioydinlaskuri on kondensaatiotekniikkaan perustuva hiukkaslaskuri. Sen tarkoituksena on suurentaa pienet hiukkaset riittävän suuriksi, jotta ne kyetään optisin menetelmin havaitsemaan. Menetelmässä pieniä hiukkasia sisältävään aerosoliin lisätään höyryä, joka jäähtyessään kondensoituu hiukkasten pinnoille suurentaen ne optisin menetelmin havaittaviksi. Höyrystettävänä nesteinä toimii usein butanoli tai vesi. (2, s. 47.)

Kuvassa 2 on esitetty CPC-tyyppisen hiukkaslaskurin toiminta. Aerosoli virtaa lämmitetyn alkoholiaaltaan ylitse, jolloin aerosoli saturoituu höyrystyneestä alkoholista. Saturoitunut aerosoli virtaa ulkoisesti jäädytetystä putkesta muodostuvaan kondenseriin, jossa alkoholi kondensoituu pienten hiukkasten pinnoille tehden niistä suurempia. Lopuksi suurennettut hiukkaset virtaavat OPC-laskurin lävitse, jossa ne havaitaan laserin ja valoanturin avulla. OPC-anturi tuottaa jännitepulsseja aerosolin sisältämän hiukkasmäärän mukaan ja nämä jännitepulssit lasketaan tarkan hiukkasmäärän määrittämiseksi.



Kuva 2. CPC-kaaviokuva (2, s. 52).

Menetelmää käytetään alle 200 nm:in hiukkasten havaitsemiseksi ja sillä voidaan havaita hiukkasia jopa kokoluokasta 2 nm. Hiukkaset kasvavat kondensaatiomenetelmällä μm -luokkaan, jolloin ne ovat helposti havaittavissa optisia menetelmiä käyttäen. (2, s.47.)

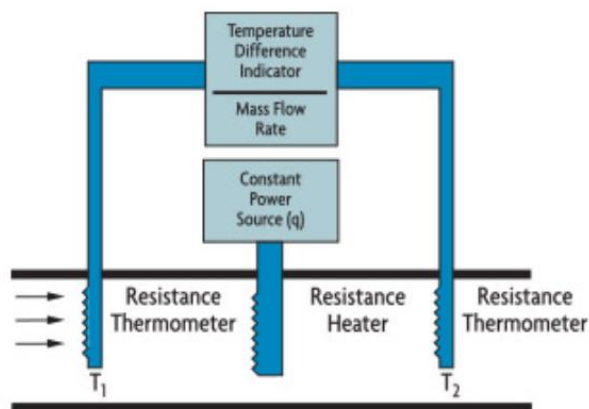
3 Prosessin ohjaus

Luvussa käsitellään hiukkaslaskurin kannalta olennaisimmat prosessin hallintaan liittyvät mittaustekniikat, toimilaitteet, sekä ohjaustekniikat.

3.1 Kaasun virtaaman mittaus

Kaasun virtaamaa mitattaessa tulee huomioida kaasun tilavuuden suhteellisuus sen paineeseen, sekä lämpötilaan. Tämä vaikuttaa mittausprosessiin, jossa kaasun virtaama määritetään sen tilavuuden perusteella. Virtaama voidaan myös mitata lämmön siirtymiseen perustuvalla massavirtamittarilla, joka on riippumaton mitattavan kaasun ominaisuuksista. Tämä mittaustekniikka on hyvin yleinen pienten virtaamien mittauksessa, sillä saavutetun herkkyyden ansiosta.

Lämmön siirtoon perustuva virtausmittari on esitetty kuvassa 3 ja se koostuu kahdesta putkeen peräkkäin sijoitetusta resistiivisestä lämpötilamittauksesta, sekä näiden väliin sijoitetusta lämmittimestä.



Kuva 3. Lämmön siirtymiseen perustuvan virtausanturin rakenne (3).

Kun lämmitintä lämmitetään, alkaa sitä ympäröivä kaasu lämmetä ja tämä kaasun lämpeneminen havaitaan lämpötilamittareilla. Kaasun virratessa muodostuu kahden lämpömittarin välille lämpötilaero. Lämpötilaero voidaan pitää lämmittimen avulla vakiona, jolloin virtaaman suuruus saadaan määritettyä lämmitykseen kuluvan lämmitystehon perusteella. Virtaama voidaan määrittää myös pitämällä lämmittimen lämmitysteho vakiona

ja laskemalla virtaama lämpömittareiden välillä olevan lämpötilaeron suuruuden perusteella. (3.)

Kun lämpötilamittaukset ja lämmitin sijoitetaan mitattavan kaasun sekaan, kuten kuvan 4 esittävässä rakenteessa, saadaan virtausmittauksesta täysin lineaarinen. Anturi voidaan toteuttaa myös sijoittamalla lämpömittaukset ja lämmitin putken pintaan siten, että ne eivät ole suoraan kontaktissa mitattavaan kaasuun. Tämä aiheuttaa hitautta mittaukseen sekä tekee siitä epälineaarisen. (3.)

3.2 Peltier-jäähdytyslementti

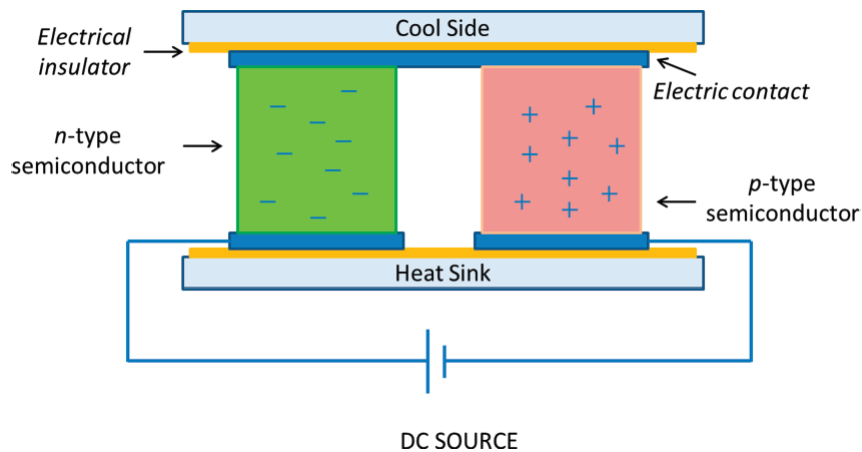
Peltier-elementti on lämpösähköiseen ilmiöön perustuva laite, jolla siirretään lämpöä elementin puolten välillä. Kun elementin läpi johdetaan virtaa alkaa sen toinen puoli jäähtymään ja toinen lämpenemään. Virran kulkusuuntaa vaihtamalla saadaan myös lämmön siirtymissuunta vaihtumaan. (4, s. 2–3.)

Elementti muodostuu tyypillisesti eri Peltier-vakion omaavista n- ja p-tyyppin puolijohdeista, jotka kytketään sähköisesti sarjaan keskenään. Sarjaan kytkettyjen puolijohdeiden rajapinnoista toinen lämpenee, toisen rajapinnan jäähtyessä. Rajapintojen välillä siirtyvä lämpöenergia aikayksikköä kohden on esitetty yhtälössä:

$$Q_{\Pi} = (\Pi_1 - \Pi_2)J, \quad (1)$$

jossa $\Pi_{1,2}$ ovat eri puolijohdeiden peltier-vakiot ja J on kokonaissähkövirta (4, s. 2).

Tyypillisen Peltier-elementin rakenne on esitetty kuvassa 4. Kuvassa nähdään p- ja n-tyyppin puolijohdeiden rajapinnat ja niistä muodostuvat kylmä ja kuuma puoli. Sähköiset rajapinnat eristetään Peltier-elementin ulkokuoresta. Tyypillinen Peltier-elementeillä saavutettu eri puolten välinen lämpötilaero ΔT on 70 °C käyttöjännitteen ollessa alle 20 voltin luokkaa (5).



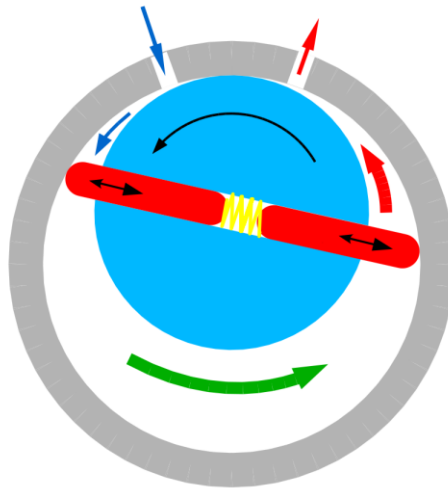
Kuva 4. Peltier-elementin rakenne (4, s. 2).

Elementin käyttämä virta on kaavan 1 mukaisesti suoraan verrannollinen siirretyn lämpöenergian suuruuteen. Tämän takia Peltier-elementtien jäähdytystehoa säädetään tyyppillisesti käyttäen säätävää virtalähdettä, jännitelähteen sijaan. Useat valmistajat eivät suosittele elementtien säätämistä pulssinleveysmodulaatiota hyödyntäen, sillä se laskee elementin jo valmiiksi heikkoa hyötysuhdetta entisestään (5).

3.3 Kaasupumppu

Kaasuja pumpataan pääsääntöisesti kaasuille tarkoitetuilla tyhjiöpumpuilla, mutta periaatteessa niitä voidaan pumpata millä tahansa matalan viskositeetin aineille suunnitelluilla pumpuilla, varsinkin jos vaadittavat paineet ovat matalia. Yksi monikäyttöisimmistä pumpuista, joka soveltuu niin korkean kuin matalan viskositeetin aineille ja korkean paineen- tai tyhjiön tuottamiseen, on siipipumppu.

Siipipumppu on positiivinen syrjäytyspumppu, jota pyöritetään sähkömoottorilla. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaisen siipipumpun rakenne ja se koostuu pyörivästä roottorista sekä siihen kiinnitetyistä siivistä. Roottori on sijoitettu kiinni pumpun kammion seinämään siten, ettei pumpattava aine pääse virtaamaan roottorin ja seinämän välistä.



Kuva 5. Siipipumpun rakenne (6).

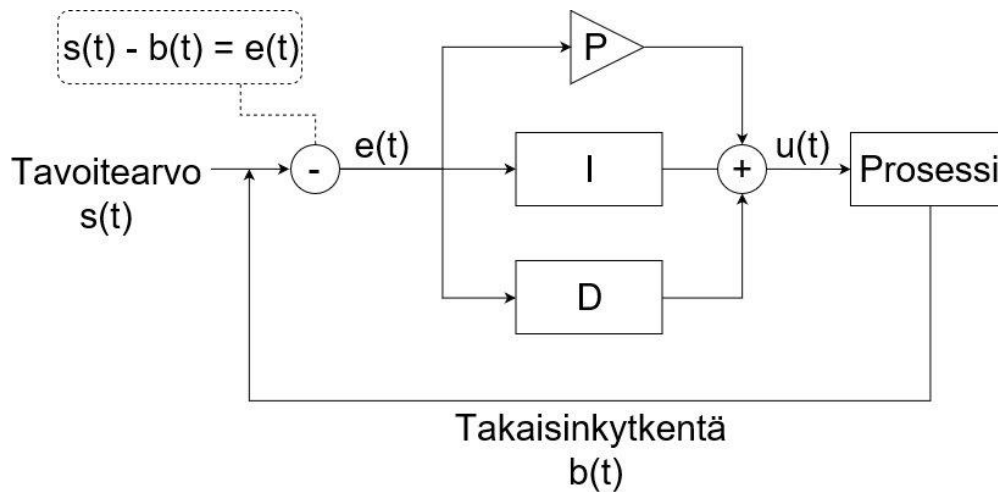
Roottorin pyöriessä painautuvat siihen kiinnitetyt siivet kiinni pumppukammion seinämiin näennäisen keskipakoisvoiman avulla tai pienillä pyörimisnopeuksilla tarvittaessa jou-siavusteisesti. Nämä siipien ja roottorin muodostamat tiiviit liitokset tuovat pumppuun erinomaisen imukyvyn. Tiiviit liitokset mahdollistavat myös suuren paineen tuottamisen pumpun lähtöön, tai matalapaineisen tyhjiön pumpun syöttöön. Pumppua voidaan käyttää niin nesteen, kuin kaasunkin liikuttamiseen. Parhaiten se kuitenkin toimii matalien viskositeettien aineilla, jotka täyttävät sen muodostavat onkalot helposti. (7.)

3.4 PID-säätö

PID-säädin, eli porportional-integral-derivative-säädin saa nimensä kolmesta toimintoa kuvaavasta termistä: suhteellinen, integroiva ja derivoiva. PID-säädin on yleisin takaisin-kytkentää hyödyntävä säätötekniikassa käytetty säädin. Sen lähtö u koostuu kolmesta matemaattisesta termistä kaavan

$$u = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (2)$$

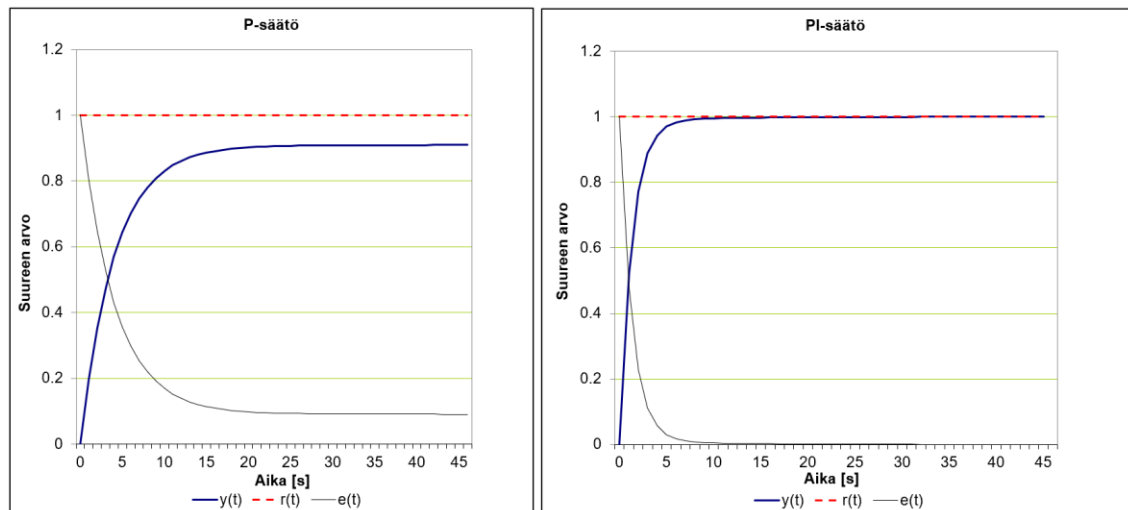
mukaisesti, jossa sisäänmenoa kuvastaa erosuure e . Erosuureella kuvataan säätövirhettä, eli säädettävän suureen tavoitearvon ja oloarvon välistä erotusta. (8.) Kuvassa 6 on esitetty PID-säädön lohkokaavio, jossa tavoitearvo $s(t)$ säädetään prosessille syöte-tyksi lähdeksi $u(t)$.



Kuva 6. PID-säädön lohkokkaavio.

Ensimmäinen termi eli suhde (P) perustuu ainoastaan erosuureen käyttämiseen säätämässä. Mitä suurempi on tavoitearvon ja todellisen arvon ero, sitä suurempi on säätimen ulostulo. Todellisen arvon lähestyessä tavoitearvoa pienenee säätimen ulostulo ja todellisen arvon muutosnopeus hidastuu. Koska muutosnopeus hidastuu, saavuttaa ulostulo jossain vaiheessa tilan, jossa se ei ole enää riittävän suuri ylittämään muutosta vastustavien tekijöiden vaikutusta. Tästä johtuen pelkkää suhde-termiä käytettäessä jää tavoitearvon ja oloarvon väliin aina pieni jatkuvuustilan virhe, eikä erosuure koskaan saavuta arvoa 0 (katso kuva 8). Suhde-termissä oleva kerroin K_P määrittää erosuureen kerroimen, joka vaikuttaa säädön nopeuteen. Liian suurta kerrointa käytettäessä säätö kuitenkin muuttuu epästabiiliksi ja alkaa oskilloida tavoitearvon ympärillä. (8.)

Toinen osa eli integrointiosa (I) perustuu erosuureen suuruuteen, sekä erosuureen kesto-aikaan. Se integroi erosuureen ajan suhteen ennalta määritetyltä aikaväliltä ja saa näin aikaan muutoksen säädön lähtöön pienelläkin erosuureen arvolla. Koska pienikin erosuureen arvo saa aikaan suhteellisen suuren muutoksen, saadaan jatkuvuustilan virhe eliminoitua säädöstä integrointiosan avulla. Integrointiosan vahvistuksena käytetään termiä K_I . Usein käytetään myös termiä integrointiaika T_I , joka on kääntäen verrannollinen suhteessa vahvistukseen. Tällöin pieni integrointiaika saa aikaan suuren muutoksen ja suuri integrointiaika taas pienen muutoksen. (8.) Kuvasta 7 nähdään integrointiosan lisäämisen vaikutus. Pelkkää P-säätöä käytettäessä ei prosessi $y(t)$ koskaan saavuta tavoitearvoa $r(t)$, sillä erosuure $e(t)$ laskee liian pieneksi. Integrointiosan lisäämällä saadaan PI-säätäjä, joka erosuureen pienenemisestä huolimatta saavuttaa prosessin tavoitearvon.



Kuva 7. Integrointiosan lisäämisen vaikutus P-säätäjään. Vasemmalla puhdas P-säätö ja oikealla PI-säätö.

Kolmas osa eli derivoitiosa (D) perustuu erosuureen muutosnopeuden avulla tehtävään ennakkointiin. Hitaan dynamiikan prosesseissa säädön muutokset havaitaan vasta pienen ajan kuluttua, joten derivoitiosaa voidaan käyttää nopeuttamaan prosessin säätämistä. Jos prosessissa kuitenkin on viivettä voi derivoitiosa saada sen epästabiiliksi, viiveen määrästä riippuen. Derivoitiosa reagoi myös korkeisiin taajuuksiin voimakkaasti, joita esim. mittauskohina usein sisältää.

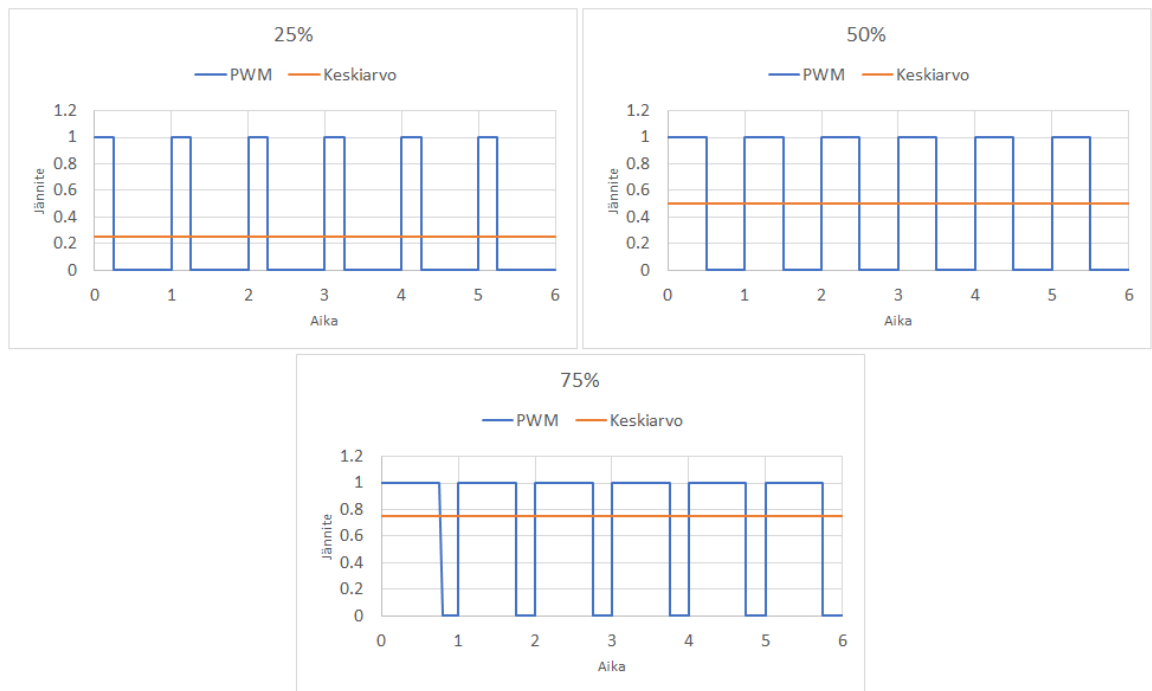
3.5 Pulssinleveysmodulaatio (PWM)

Digitaalielektronikassa ohjaukseen käytetyt signaalit voivat olla ainoastaan joko päällä tai pois päältä (0 tai 1). Ohjattavat laitteet kuitenkin toimivat analogisilla signaaleilla, jotka voivat sisältää äärettömän määrän tiloja 0:n ja 1:n väliltä. Jotta näitä analogisia laitteita voidaan ohjata digitaalisesti, tulee ohjauksessa hyödyntää esimerkiksi pulssinleveysmodulaatiota.

Pulssinleveysmodulaatiossa muodostetaan keinotekoinen analoginen jännite liittämällä lyhyitä tasaisesta jännitelähteestä saatuja pulsseja toisiinsa. Pulssien pituutta säätämällä saadaan säädettyä tietyn ajanjakson keskiarvoa ja näin ollen myös lähtöjännitteen suuruutta. Nämä pulssit muodostetaan käyttämällä jotakin digitaalisella signaalilla ohjattavaa nopeaa kytkinkomponenttia. Menetelmää hyödyntäen voidaan säätää tasaisen

DC-jännitteen suuruutta sekä useampia kytkinkomponentteja käyttäen tuottaa siitä myös halutun suuruinen ja taajuinen AC-jännite. (9, s.46.)

Kuvassa 8 on esitetty PWM-signaali kolmella eri pulssisuhteella. Pulssisuhteella tarkoitetaan sitä aikaa, jonka signaali on päällä suhteessa siihen aikaan, jonka se on pois päältä. Asettamalla pulssisuhte 100 %:iin saadaan ulostuloon sama moduloimaton jännite kuin ilman pulssinleveysmodulaatiota käytettäessäkin.



Kuva 8. PWM-signaali 25 %:n, 50 %:n ja 75 %:n pulssisuhteilla, sekä jokaisen signaalin keskiarvo.

Yksi merkittävimmistä pulssinleveysmodulaation eduista suhteessa esimerkiksi resistansseilla tapahtuvaan jännitteen säätöön on sen hyvä hyötysuhde. Koska ohjaus perustuu kytkimenä toimivaan komponenttiin, joka on suurimman osan ajasta johtavana, tai estää virran kulun kokonaan, ovat siinä tapahtuvat tehohäviöt hyvin maltillisia. Negatiivisena ominaisuutena mainittakoon saavutetun jännitteen muoto, joka on hyvin kaukana tyypillisestä DC-jännitteestä. Tämä moduloitu jännite saadaan kuitenkin tasattua helposti käyttämällä lähdössä jotain energiaa varastoivaa komponenttia, kuten kondensaattoria.

4 Prosessin ohjauksen toteutus

Prosessin ohjaus toteutettiin Python-skriptillä, jota ajettiin Raspberry Pi:llä.

4.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi tai lyhennettynä RPi on ARM-mobiiliprosessorilla ja lukuisilla liitännöillä varustettu pienoistietokone. Siihen voidaan asentaa valmistajan kehittämä avoimen lähdekoodin graafinen käyttöjärjestelmä, jolloin erilaisten ohjelmaskriptien ajaminen laitteella on helppoa. Hiukkaslaskurin toiminnan kannalta keskeisimmät ominaisuudet ovat

- muistikorttipaikka datan tallennusta varten
- 40 kpl GPIO (general purpose input output) -pinniä sensoreille ja toimilaitteille
- hyvät laajennusmahdollisuudet esimerkiksi GPS- ja mobiilidatayhteyksille
- helppo ohjelmointi.

Raspberry Pi:n heikkoutena voidaan pitää analogisten syöttöliitäntöjen puutetta, jolloin jännitetietoa hyödyntävien antureiden käyttö ei suoraan onnistu. Koska tiedon syöttö laitteelle onnistuu vain digitaalisesti, tulee antureiden ja RPi:n välillä käyttää ADC-muuntimia. (10.)

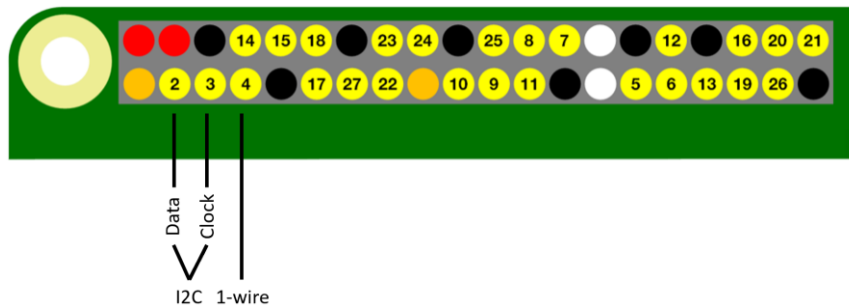
GPIO

GPIO toimii 3,3 voltin jännitteellä ja kaikki kuvassa 9 näkyvät numeroidut pinnit ovat ohjelmoitavissa syötöiksi tai lähdöiksi. Kummassakin tapauksessa tila "high" tai 1 tarkoittaa 3,3 V:n jännitettä ja tila "low" tai 0 tarkoittaa 0 V:n jännitettä. Missään tapauksessa GPIO-pinniin ei saa kohdistaa yli 3,3 V jännitettä tai alle 0 V:n jännitettä. (11.)

GPIO-lähdön virranantokyky voidaan ohjelmallisesti määrittää 2–16 mA:n väliltä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita suurinta mahdollista virtaa, jonka pinnistä voi ottaa, eikä virtarajaa, johon pinnin maksimivirta rajoittuisi. Tällä tarkoitetaan pinnin lähtöimpedanssin määrää eli lähdön sisäisen jännitteenaleneman määrää. Todellinen virtakestoisuus yhdelle pinnille on 16 mA siten, ettei käytettävien pinnien yhteisvirta kuitenkaan kohoa yli 51 mA:n.

Ohjattavia laitteita GPIO-liitäntään liitettäessä tulee virran rajoituksen kanssa olla tarkkana.

Osaa pinneistä voidaan myös käyttää digitaalisina sarjaliikenneväylinä. Valittavissa olevat väylät ovat I²C, SPI, 1-wire ja UART. Hiukkaslaskurin ohjauksessa käytetyt sarjaliikenneväylät ovat I²C, sekä 1-wire ja ne sijoittuvat GPIO liitäntään kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9. Raspberry Pi:n 40 pinninen GPIO-liitäntä. Kuva muokattu lähteen kuvasta (11).

I²C tai I2C on lyhyen matkan tiedonsiirtoväylä, jota käytetään esimerkiksi mikrokontrollerin ja ADC-muuntimen väliseen tiedonsiirtoon. Jokaisella slave-laitteella on oma 7-bitinen osoitteensa, joten niitä voidaan ketjuttaa yhteen väylään 128 kappaletta. Väylä koostuu kahdesta johtimesta, Data ja Clock. (12.)

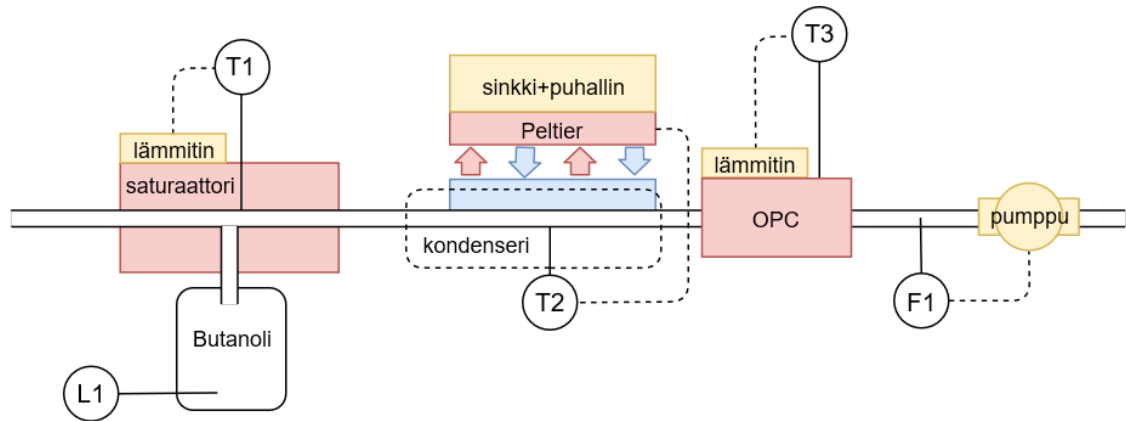
1-wire tai *one wire* on tiedonsiirtoväylä, jota käytetään esimerkiksi digitaalisen sensorin ja mikrokontrollerin väliseen tiedonsiirtoon. Jokaisella slave-laitteella on kiinteä 64 bittinen tehtaalla koodattu osoitteensa, joten laitteita voidaan ketjuttaa käytännössä äärettömästi. Väylä koostuu yhdestä datajohtimesta sekä datasiinaalin referenssinä käytettävästä maadoitusjohtimesta. (13.)

4.2 Mittausprosessi

Mittausprosessi on esitetty kuvassa 10 ja se koostuu

- saturaattoria lämmittävästä lämmittimestä ja sitä ohjaavasta lämpötila-anturista
- butanolisäiliön nesteen tasoa mittaavasta tasoanturista

- kondenseria jäähdyttävästä jäähdytys-elementistä ja sitä ohjaavasta lämpötila-anturista
- kondenserin jäähdytys-elementtiä jäähdyttävästä sinkki-puhallinyhdistelmästä
- optista hiukkasanturia lämmittävästä lämmittimestä ja sitä ohjaavasta lämpötila-anturista
- aerosolia liikuttavasta pumpusta ja sitä ohjaavasta virtausmittarista.



Kuva 10. Mittausprosessin vaatimat anturit. T1 on saturaattorin lämpötila, T2 on kondenserin lämpötila, T3 on OPC-laskurin lämpötila, L1 on butanolinesteen tasoanturi ja F1 on aerosolin virtaama.

Saturaattorin lämmittimellä lämmitetään saturaattoria, kunnes anturin T1 mittaama lämpötila saavuttaa halutun arvon. Butanolin pintaa valvotaan tasoanturilla L1, jottei butanolin määrä pääse laskemaan liian alhaiseksi.

Kondenseria jäähdytetään peltier-jäähdytys-elementeillä, kunnes T2:n mittaama lämpötila laskee haluttuun arvoon. Jäähdytys-elementtien kuumaa puolta jäähdytetään pakotetulla konvektiolla käyttäen sinkki-puhallinyhdistelmää.

Jotta höyrystynyt butanoli ei kondensoituisi OPC-laskurin sisälle tulee sen lämpötila pitää saturaattorin lämpötilaa korkeamana. Sen lämpötilaa säädellään omalla lämmittimellä, jota ohjaa OPC:n lämpötilaa mittaava lämpötila-anturi T3.

Ilmapumpulla tuotetaan aerosolin virtaama mittalaitteen sisälle. Sitä ohjaa virtausmittari F1. Virtausmittaria käytetään myös massavirran mittaamiseen, jotta hiukkasten lukumäärä tiettyä tilavuusyksikköä kohden voidaan määrittää.

4.3 Anturit ja vaaditut ADC-muuntimet

Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittaukset toteutettiin valmistajan Maxim Integrated valmistamalla digitaalisella lämpötila-anturilla, mallinumero DS18B20. Anturi sisältää integroidun ADC-muuntimen, ja se käyttää 1-wire tiedonsiirtoväylää, joten se voidaan kytkeä suoraan Raspberry Pi:n 1-wire liitäntään. Anturia voidaan käyttää myös tarvittaessa ilman jännitejohdinta ”parasitic power” -tilassa, jolloin se ottaa tarvitsemansa tehon datajohdinta pitkin. Tässä työssä anturille kuitenkin vietiin käyttöjännite omalla johtimellaan mahdollisten ongelmien välttämiseksi. Erillistä jännitesyöttöä käytettäessä tulee datajohtimen ja jännitejohtimen väliin kytkeä ylösvetovastus. (14, s. 1.)

Anturi palauttaa lämpötilan master-laitteelle suoraan celsiusasteina ja palautettavan arvon resoluutio on ohjelmallisesti valittavissa 9, 10, 11 tai 12 bitin väliltä (kts. taulukko1). Ennen palauttamista anturin tulee kääntää analogisen lämpötila-arvon digitaalseksi. Tähän käännökseen kuluva aika on kääntäen verrannollinen käytettyyn resoluutioon nähdessä taulukon 1 mukaisesti (14, s. 23).

Taulukko 1. DS18B20-anturin resoluution suhde kääntöaikaan.

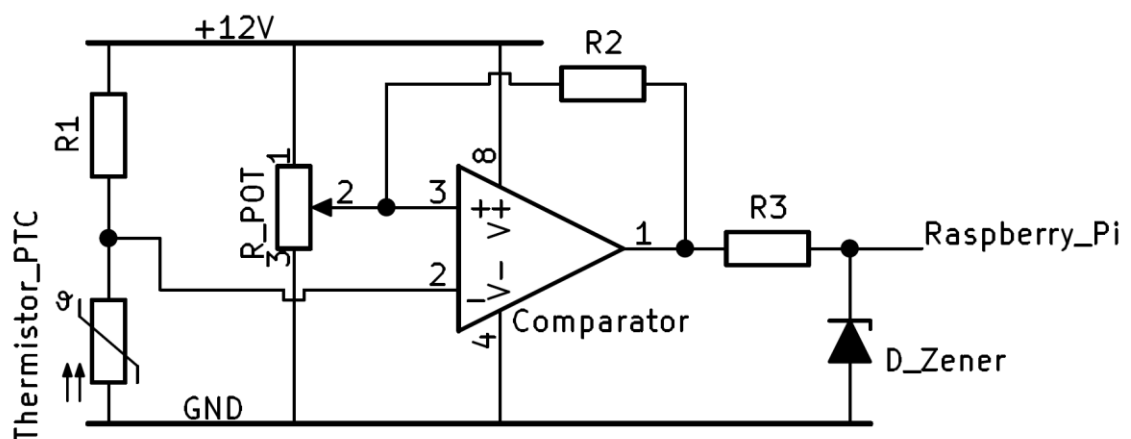
| Resoluutio (bittinä) | Resoluutio (°C) | Kääntöaika max. (ms) |
|----------------------|-----------------|----------------------|
| 9 | 0,5 | 93,75 |
| 10 | 0,25 | 187,5 |
| 11 | 0,125 | 375 |
| 12 | 0,0625 | 750 |

Kääntöaika on annettu maksimiarvona, eli se on suurin mitattu aika, jonka anturi on testiolosuhteissa käännökseen tekemiseen käyttänyt (14, s.3). Kääntöaikaa voidaan pitää myös anturin suurimpana mahdollisena päivitystaajuutena. Lämpötilaohjauksen dynaamiset vaatimukset eivät ole suuret, mutta resoluutio tulisi silti valita mahdollisimman alhaiseksi hyvän säädön aikaansaamiseksi, kuitenkin lämpötilan tarkkuusvaatimukset huomioiden.

Pinnan tasoanturi

Butanolin pinnan tasoanturi toteutettiin käyttämällä PTC-termistorin itselämmittävää ominaisuutta hyväksi. Kun termistoriin kytketään jännite alkaa se lämpenemään ja sen resistanssi kasvamaan. Nesteeseen upotettuna pysyy termistorin lämpötila, sekä resistanssi kuitenkin suhteellisen vakiona nesteen luonnollisen konvektion ansiosta. Nesteen tason laskiessa paljastuu termistori ilmalle ja lämpötilan kasvun myötä lähtee myös resistanssi kasvuun. (15.) Tämä voidaan helposti havaita komparaattorin ja jännitejaon avulla.

Kuvassa 11 on esitetty piiri termistorin resistanssin muutoksen havaitsemiseksi. Vastuksen R1 ja termistorin resistanssin suhde valitaan siten, että nesteeseen upotettuna komparaattorin invertoivan tulon jännite jää hieman positiivista tuloa alemmaksi. Tällöin komparaattorin ulostulo on positiivinen, +12 V. Termistorin paljastuessa ilmalle kasvaa sen resistanssi, jolloin komparaattorin negatiivinen jännite kasvaa positiivista suuremmaksi ja ulostulo muuttuu negatiiviseksi. Tässä tapauksessa nollapotentialiin. Näin saadaan tuotettua digitaalinen tilatieto nesteen tasosta, jossa 1 tarkoittaa nesteen olevan yli mittapisteen ja 0 nesteen olevan alle mittapisteen.



Kuva 11. Kytkentä termistorin resistanssimuutosten havaitsemiseen.

Kohdassa 4.1 käsiteltiin Raspberry Pi:n GPIO-liitäntän toimintaa ja huomattiin sen tulkitsevan +3,3 voltin todeksi (1) ja 0 Voltin epätodeksi (0). Komparaattorin ulostulon jännite tulee siis alentaa sille soveltuvaan tasoon, 12 voltista 3,3 volttiin. Tämä toteutetaan zener-diodilla, jonka zener-jännite on 3,3 V. Zener-diodin virtaa rajoittaa vastus R3, joka

mitoitetaan zener-diodin virtakestoisuuden mukaan. Käytössä on myös positiivinen takaisinkytkentä pienen hystereesin aikaansaamiseksi.

Virtausmittaus

Virtausmittausanturilta saatava massavirran suuruus toimitetaan analogisena 1 V–6 V jännitetietona, joten se tuli muuntaa digitaaliseksi Raspberry Pi:tä varten. Tämä toteutettiin käyttämällä valmista omalla piirilevyllään olevaa I²C-tiedonsiirtoväylällä toimivaa ADC-muunninta.

Optinen hiukkaslaskuri

OPC-laskuri sisältää oman elektroniikkansa, joka tuottaa analogisia jännitepulsseja. Yksi pulssi vastaa yhtä hiukkasta, joten hiukkasten lukumäärän laskeminen voidaan toteuttaa suoraan ohjelmallisesti Raspberry Pi:llä näiden jännitepulssien perusteella. Pulssien amplitudi tulee kuitenkin muuntaa vaaditulle 3,3 V:n tasolle.

4.4 Toimilaitteet

Kaikkia toimilaitteita ohjataan Raspberry Pi:n GPIO-pinneillä, jotka voidaan ohjelmoida asettaa arvoon low (0 V) tai high (3,3 V). Kuten alaluvussa 4.1 todettiin, on yksittäisen pinnan suurin kestävä virta vain 16 mA:n. Jotta suuremman virran käyttäviä laitteita voitiin ohjata, kytkettiin pinnan ja toimilaitteen väliin optinen staattinen rele.

Optisesti ohjattu staattinen rele sisältää ledin, joka syttyessään valaisee transistorin hilaan kytketyn fotodiodin ja saa tämän johtavaan tilaan. Fotodiodin ollessa kytkettynä transistorin hilaan vaihtuu myös transistorin tila johtavaksi. Tällä saavutetaan sähköisesti toisistaan eristetyt input ja output, sekä tarvittaessa erittäin nopea kytkentätaajuus. (16.)

Koska releen ohjaus perustuu ledin ohjaukseen, on siihen vaadittava virta erittäin pieni, parhaimmillaan 3 mA luokkaa. Tämän virran Raspberry Pi pystyy tuottamaan ongelmitta.

Peltier-jäähdytyslementti

Jäähdytystehoa säädettiin alaluvussa 3.5 esitellyn pulssinleveysmodulaation avulla. Tarkan loppulämpötilan saavuttamiseksi käytettiin alaluvussa 3.4 esiteltyä PID-säätöä. Elementin lämpenevää puolta on syytä jäähdyttää lämpösinkin ja puhaltimen avulla, jotta elementti ei ylikuumene ja vaurioidu. Jotta jäähdytysinkin ja elementin liitoksesta saadaan mahdollisimman tiivis ja lämmön johtuminen mahdollisimman hyväksi, on suositeltavaa käyttää kiinnitykseen lämpörasvaa. Lämpörasvaa tulee käyttää myös Peltier-elementin kylmän puolen ja jäähdytettävän pinnan välissä parhaan kontaktin saavuttamiseksi.

Lämmittimet

Kaikki lämmittimet toteutettiin käyttämällä normaalia tehovastusta. Myös Peltier-elementtiä olisi voitu käyttää lämmittämistarkoitukseen, mutta niiden korkea hinta suhteessa tehovastuksen hintaan tekee siitä epäedullisen vaihtoehdon. Lämmittimien lämmitystehon- ja lämpötilan säätö toteutettiin kuten Peltier-elementeissä, pulssinleveysmodulaation ja PID-säädön avulla.

Lämmittimet kiinnitetään lämmitettävään pintaan lämpörasvaa käyttäen parhaan mahdollisen kontaktin saavuttamiseksi.

Kaasupumppu

Mitattavaa ilmaa liikutettiin hiukkaslaskurin läpi alaluvussa 3.3 esitellyn pienen siipipumpun avulla. Kaasupumpun virtaaman säätö saavutettiin käyttämällä pulssinleveysmodulaatiota, sekä PID-säätöä.

Puhaltimet

Sinkki-puhallinyhdistelmän jäähdytysteho voidaan pitää vakiona, joten puhallin ei tarvitse aktiivista ohjausta. Peltier-elementtien jäähdytysinkkien puhaltimina käytettiin hyvin yleistä juuri jäähdytysinkkien kanssa käytettäväksi suunniteltua aksiaalipuhallinta.

5 Piirilevyjen toteutus

5.1 Piirilevyiltä vaaditut ominaisuudet

Piirilevyjen fyysiset mitat vastasivat luonnollisesti Raspberry Pi:n mittoja, sillä ne oli tarkoitus sijoittaa keskenään toistensa päälle. Näin ollen myös RPi:n kiinnitysruuvien reikien ja GPIO-pinnien sijaintien tuli vastata suunniteltavien piirilevyjen vastaavia sijain- teja. RPi:n ollessa avoimen lähdekoodin projekti löytyi sen dokumentaatio internetistä helposti ja sijoittelu onnistui tarkasti.

Päällekkäin sijoitettuja piirilevyjä ei tullut juottaa kiinni toisiinsa, vaan tuli piirilevyt liittää toisiinsa pitkien pinnien ja liitinten avulla. Näin saavutettiin helppo purettavuus ja korjat- tavuus. Komponenttien tuli olla käsin juotettavissa, joten pintaliitoskomponenttien käyt- tämistä tuli välttää.

Suurin piirilevyllä käytetty jännite oli 12 V ja pienin -12 V, joten korkein piirilevyllä muo- dostuva potentiaaliero olisi 24 V. Tämän takia kaikki käytetyt ilmavälit johdinviivojen ja komponenttien jalkojen välillä pidettiin vähintään 0,25 mm:ssä. Suurin yksittäinen virta oli 4 A, joka muodostui kahden Peltier-elementin ohjauksesta. Virran suuruuden takia levyt tuotettiin tavallista paksummalla kuparipinnoitteella ja kaikki tehoa kuljettavat joh- dinviivat piirrettiin vähintään 1,1 mm:n paksuudella. Heikkoja korkeataajuisia signaaleita piirilevyllä ei käsitelty, joten erityistä häiriönsuojausta levyiltä ei vaadittu.

5.2 Piirilevyjen suunnittelu

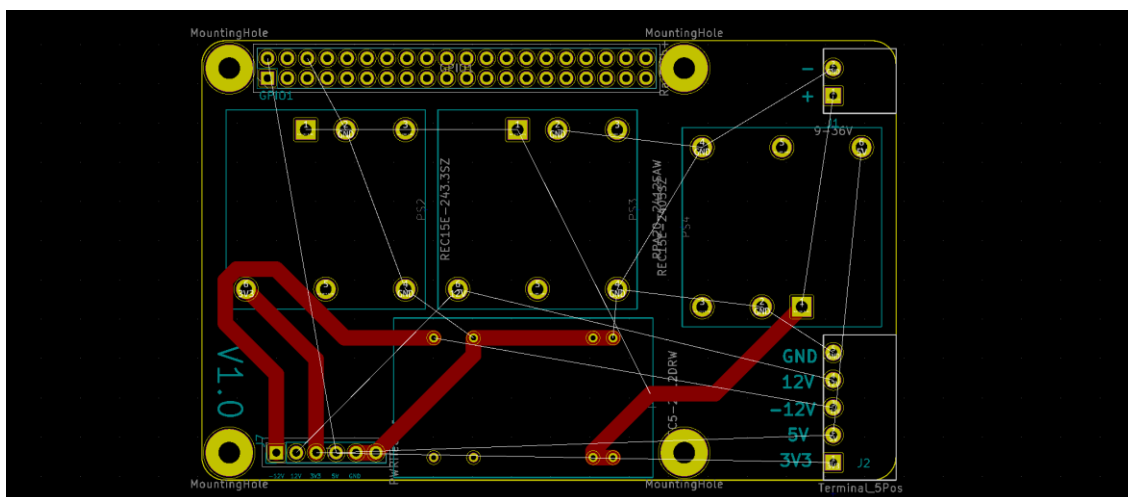
Suunnittelu onnistuu nykypäivänä helpoiten tietokoneavusteista ohjelmistoa käyttäen, jota myös tämän työn tekemisessä hyödynnettiin. Käytetystä ohjelmasta lisää kohdassa 5.4.

Piirilevyn suunnittelu aloitetaan lopullisten komponenttivalintojen tekemisellä. Myös kom- ponenttien virtakestoisuudet ja todelliset arvot tulisi päättää mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Esimerkiksi useampijalkaisissa komponenteissa saattaa jalkojen järjestys ja määrä muuttua valittujen ominaisuuksien perusteella. Valitut ominaisuudet ja komponen-

tin arvot vaikuttavat myös usein komponentin fyysiseen kokoon, joka taas vaikuttaa komponenttien sijoitteluun. Komponentteihin tulee liittää ns. footprint, joka sisältää tiedon komponentin fyysisistä mitoista ja sen jalkojen sijainnin suhteessa toisiinsa. Footprint sisältää myös komponentin yksilöllisen nimen ja jalkoja varten porattavien reikien- ja niitä ympäröivien juotosalueiden halkaisijat.

Valitut komponentit sijoitetaan piirikaavioon suunnitteluohjelman kirjastosta, tai tarvittaessa kirjastoon luodaan uusi komponentti, jonka ominaisuudet määritellään itse. Piirikaavioon sijoitetut komponentit johdotetaan toisiinsa haluttujen toiminnallisuuksien mukaan. Kun komponenttien johdotus on suunniteltu, luodaan johdotusten ja footprinttien perusteella Netlist-tiedosto, joka sisältää tiedot komponenttien välisistä johdotuksista.

Varsinaisessa piirilevyn suunnitteluohjelmistossa piirilevylle määritellään ensin sen fyysiset mitat, pituus ja leveys. Myös pyöreitä muotoja on mahdollista käyttää. Komponenttien johdotukset ja footprintit sisältävä tiedosto tuodaan piirilevyn suunnitteluohjelmaan, jossa komponentit sijoitellaan lopullisen halutun fyysisen sijainnin perusteella määriteltujen fyysisten rajojen sisään. Komponentit johdotetaan toisiinsa piirikaavion mukaan tehdyn Netlist'in perusteella, joka kertoo mikä jalka tulee yhdistää mihinkin. Kuvassa 12 nähdään suunnitteluvaiheessa oleva piirilevy. Piirilevyn ulkoreunat ovat määritelty ja komponentit sijoiteltu. Osa komponentteja yhdistävistä piirilevyn pintaan tulevista johdinvivoista on myös piirretty.



Kuva 12. Keskeneräinen piirilevysuunnitelma piirilevyn suunnitteluohjelmassa.

Johdinviivoja sijoittaessa tulee huomioida niiden välillä olevat potentiaalierot ja sijoittaa ne riittävän etäälle toisistaan, jottei läpilyöntejä pääse muodostumaan. Johdinviivojen leveyteen taas vaikuttaa johtimelta vaadittavan virtakestoisuuden suuruus. Suurempi virta vaatii leveämmän johtimen. Leveyteen vaikuttaa myös käytetyn piirilevyn kuparikerroksen paksuus.

5.3 Piirilevyjen valmistus

Piirilevy koostuu useasta eri kerroksesta ja kerrosten määrä riippuu piirilevytyypistä. Yksinkertaisimmillaan piirilevy koostuu yhdestä johdinkerroksesta, sekä piirilevyn vahvike- materiaalista. Vakiintuneet materiaalit näille ovat kupari, sekä lasikuitu. Valmistajan mukaan monimutkaisemmat piirilevyt voivat sisältää yli kymmenenkin johdinkerrosta (17). Hyvin tyypillinen piirilevyrakente sisältää kuitenkin kaksi johdinkerrosta, yhden piirilevyn päällä ja toisen pohjassa. Kyseistä rakennetta käytettiin myös tässä työssä.

Kahdesta johdinkerroksesta muodostuvan piirilevyn vahvikekerroksen paksuus on tyypillisesti 1,6 mm. Jos levytä kuitenkin vaaditaan suurempaa mekaanista kestävyyttä, tai pienempää kokoa, voidaan vahvikekerrosta tarpeen vaatiessa ohentaa tai paksuntaa. Saatavilla olevat vahvikekerroksen paksuudet ovat valmistajan mukaan 0,2–3,2 mm välillä. Vahvikekerroksen pintaan tulevan johdinkerroksen paksuus määritetään unsseina per neliöjalka, mutta lyhennetään yleensä ”oz”. 1 oz johdinkerros vastaa 34,79 µm:n paksuutta ja on yleisimmin käytetty johdinkerroksen paksuus. Johdinkerroksen paksuutta voidaan tarvittaessa kasvattaa, jos levytä vaaditaan suurempia virtakestoisuuksia. Paksuus voidaan valita valmistajan mukaan 1, 2 tai 3 oz väliltä.

Johdin- ja vahvikekerroksen lisäksi piirilevyyn on myös mahdollista saada kokoamista ja käyttöä helpottavia kerroksia, joista tyypillisimmät on esitetty taulukossa 2. Ensimmäinen kirjain ”F” tai ”B” kuvastaa kerroksen sijoittumista piirilevyille, kirjaimen ”F” kuvastaessa piirilevyn etuosaa ja ”B” sen takaosaa.

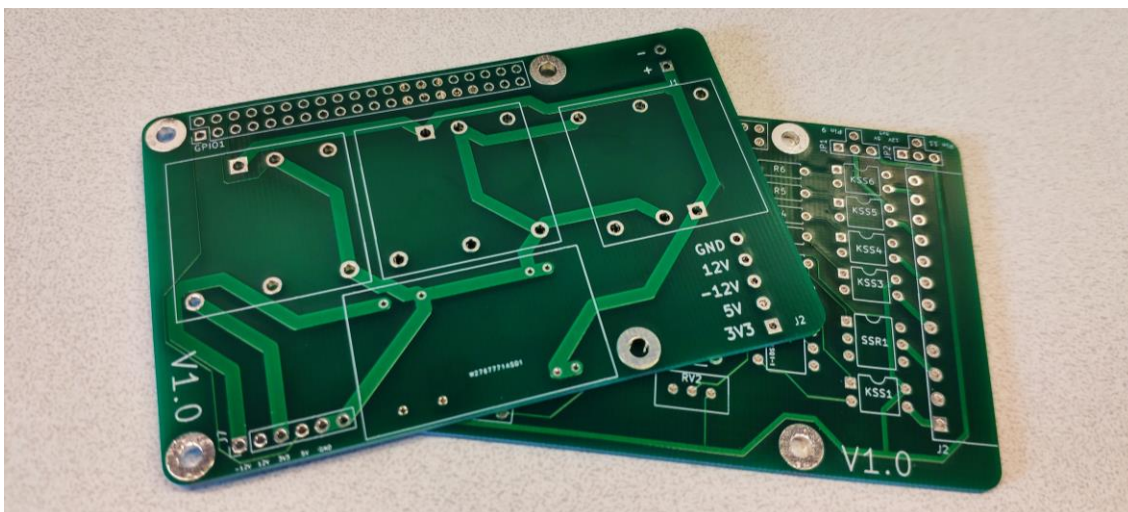
Taulukko 2. Piirilevyn eri kerrokset.

| Lyhenne | Selite |
|----------------|---------------------------|
| F.Cu, B.Cu | Kupariset johdinkerrokset |
| F.Mask, B.Mask | Juotoksenestopinnoitukset |
| F.Silk, B.Silk | Silkipainokerrokset |

Kupariset johdinkerrokset sisältävät komponentit toisiinsa yhdistävän johdinkuvion. Johdinkuvio saadaan aikaiseksi peittämällä koko piirilevyn kattavasta kuparikerroksesta johdinkuvion muotoinen alue. Paljaaksi jäänyt kuparikerros poistetaan piirilevystä kemiallisesti. (18.)

Juotoksenestopinnoite on kuparikerroksen päälle tuleva, yleensä vihreän värinen kerros. Sen pääasiallinen tarkoitus on estää juotostinan pääsy muualle, kuin komponenttien kiinni juottamiseen vaadituille alueille. Se myös suojaa kuparikerrosta fyysisiltä vaurioilta ja oksidoitumiselta.

Silkkipainokerros on piirilevyn päällimmäinen kerros ja se painetaan piirilevyn pintaan yleensä sähköä johtamattomalla epoksimusteella. Väri on tyypillisesti valkoinen. Kerrosta käytetään piirilevyn kasaamisen helpottamiseksi tulostamalla siihen komponenttien numeroinnit ja selitteet, sekä mahdolliset polariteettimerkinnot. Sillä voidaan helpottaa myös piirilevyn käyttöä tulostamalla piirilevyn toimintaa kuvaavia ohjeistuksia. Silkkipainokerros näkyy kuvassa 13 olevana valkoisena tekstinä sekä muina valkoisina merkinteinä. Kuvasta nähdään myös vihreän juotteenestopinnoitteen peittämät johdinviivat ja ilman juotteenestopinnoitetta olevat johdinmateriaalilla päällystetyt komponenttien jalvoja varten poratut reiät.



Kuva 13. Komponenttien juottamista vaille valmiit piirilevyt.

Piirilevyjen valmistamiseksi valmistaja tarvitsee tarkat piirilevy-suunnitelmat. Nämä toimitetaan suunnitteluohjelmistosta saatavina Gerber-nimisinä tiedostoina. Jokaisesta kerroksesta tulee oma tiedostonsa, jonka lisäksi komponenttien jalkoja varten porattavista rei'istä tulee yksi tiedosto.

5.4 Suunnitteluohjelmisto

Piirikaavion ja piirilevyn suunnittelemiseen käytettiin Kicad-nimistä avoimen lähdekoodin ohjelmistoa. Ohjelmisto sisältää kattavan komponenttikirjaston, footprint-kirjaston, sekä sisäänrakennetun footprint-editorin. Ohjelmistolla voidaan suunnitella piirikaaviot ja suunniteltujen piirikaavioiden perusteella myös piirilevyt. Suunnitelmat saa tulostettua yleisimpään piirilevyvalmistajien käyttämään muotoon, gerber-muotoon.

Suunnitteluohjelmisto ei välttämättä yllä maksullisten ohjelmistojen tasolle, mutta se pitää sisällään kaikki piirilevy-suunnitteluun vaadittavat ominaisuudet. Ohjelmistosta löytyy myös esimerkiksi ominaisuus katsella piirilevy-suunnitelmaa kolmiulotteisessa muodossa. Tämä helpottaa suunnitelmien hahmottamista huomattavasti, sekä auttaa havaitsemaan mahdollisia ohjelman virheellisestä käytämisestä aiheutuvia ongelmia. Myös valmiita gerber-tulosteita voi Kicad-ohjelmistolla tutkia kerros kerrokselta. Tämä on hyödyllinen ominaisuus ja tulosteet tulisikin aina selata huolellisesti läpi ennen piirilevytilauksen tekemistä. Tällöin voidaan havaita esimerkiksi mahdolliset sekaannukset yksikköjen käytössä, sillä ohjelmisto käyttää ristiin niin tuumia, kuin millimetrejäkin.

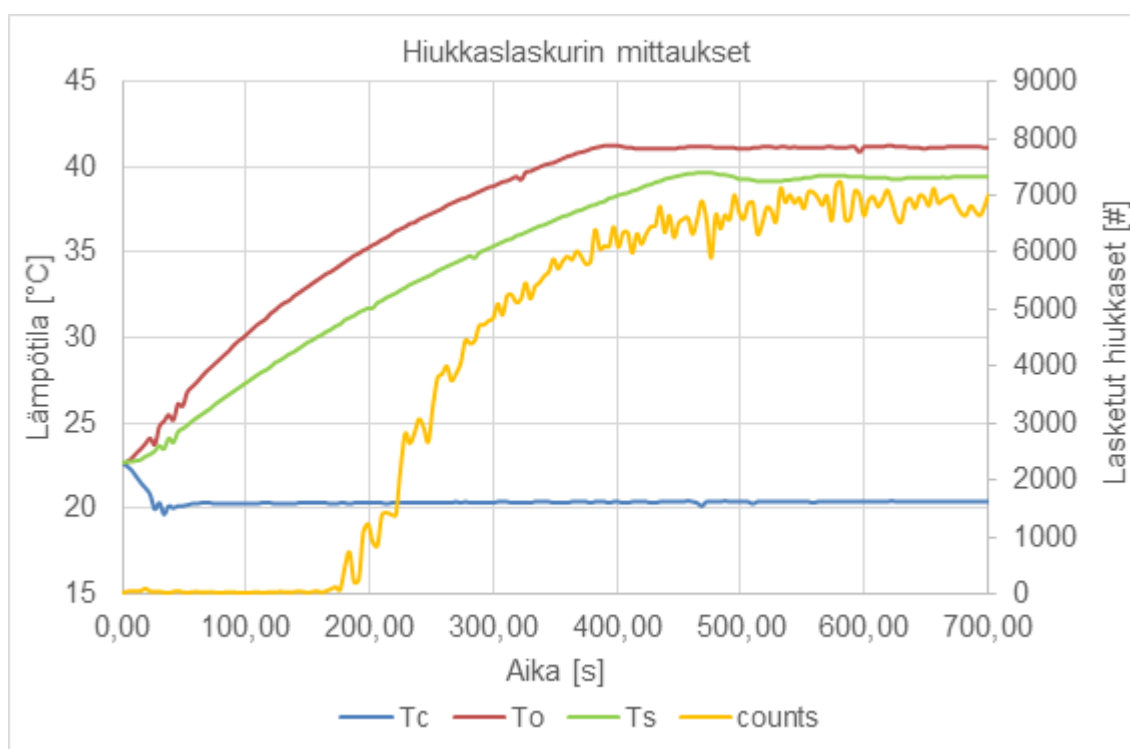
5.5 Piirilevyjen testaus

Ennen piirilevyjen liittämistä hiukkaslaskurin antureihin ja Raspberry Pi:hin, mitattiin piirilevyiltä löytyvien DC-DC-muuntimien ulostulojen todelliset jännitetasot mahdollisten suunnitteluvirheiden ja komponenttinvirheiden varalta. Jännitetasot mitattiin nolla-potentiaalia (GND) vasten piirilevyjä yhdistävistä jännitepinneistä, yleismittaria käyttäen. Mitatut jännitteet kullekin jännitetasolle on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. DC-DC-muuntimien mitatut jännitetasot.

| Jännitetaso | Mitattu jännite |
|-------------|-----------------|
| 3,3 V | 3,28 V |
| 5 V | 4,95 V |
| 12 V | 11,92 V |
| -12 V | -12,00 V |

Jännitteet vastasivat riittävällä tarkkuudella haluttuja jännitetasoja, joten levyt voitiin turvallisesti liittää Raspberry Pi:hin ja hiukkaslaskurin antureihin. Lopullinen toiminta testattiin ajamalla ohjauksen toteuttava skripti RPi:llä ja seuraamalla lämpötilojen säätymistä, sekä lasketun hiukasmäärän muuttumista. Aluksi lämpötilat säätäivät odotetusti, mutta säätöön käytettyjen staattisten releiden lämmitessä putosi niiden kytkentätaajuus huomattavasti ja säätö muuttui epästabiiliksi. Tämä korjaantui käyttämällä toisen mallisia releitä, joten ongelmaan ei paneuduttu sen syvällisemmin. Kuvassa 14 on esitetty releiden vaihdon jälkeen mitatut ohjauksen säätämät lämpötilat ja lasketut hiukkaset.



Kuva 14. Ohjauksen mittaamat lämpötilat ja laskettujen hiukkasten lukumäärä. Tc, To ja Ts ovat kondenserin-, OPC:n- ja saturaattorin lämpötilat ja counts kuvaa laskettujen hiukkasten lukumäärää.

Näytteenotto tapahtuu neljän sekunnin sykleissä, joten laskettujen hiukkasten lukumäärä on neljän sekunnin aikana laskurin läpi virranneiden hiukkasten kokonaislukumäärä.

Konsentraatio voidaan laskea, kun otetaan huomioon käytetty virtaama ja näytteenotto-
taajuus. Lopulliset lämpötilat stabiloituivat taulukon 4 mukaisiin arvoihin noin kahdeksan
minuutin kuluttua käynnistämisestä. Loppulämpötila on laskennallinen keskiarvo mit-
tauksen viimeisestä 16:ta sekunnista (4 näytettä).

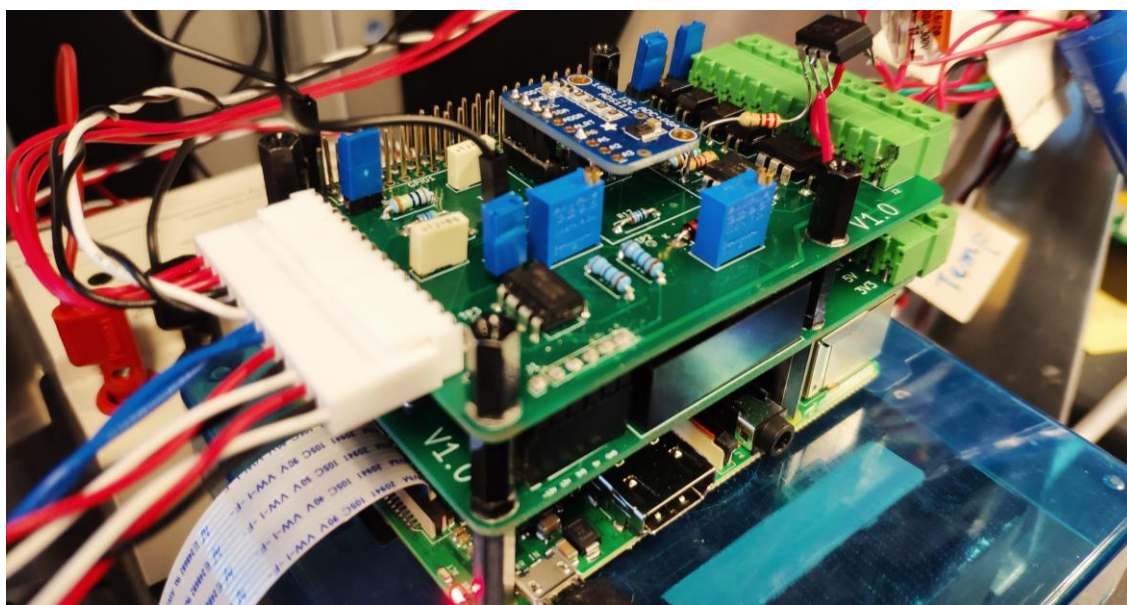
Taulukko 4. Stabiloituneet lämpötilat suhteessa asetusarvoihin

| Mittauspiste | Loppulämpötila | Asetusarvo |
|-------------------|----------------|------------|
| Kondenseri (Tc) | 20,39 °C | 20 °C |
| OPC (To) | 41,15 °C | 41 °C |
| Saturaattori (Ts) | 39,43 °C | 40 °C |

6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli tuottaa hiukkaslaskurin ohjauksen toteuttava piirilevy aiemman prototyypin mukaisesti. Käytettyihin komponentteihin tehtiin pieniä muutoksia mm. virtakeskitoisuuksiin, paremman toimintavarmuuden ja pidemmän eliniän saavuttamiseksi. Myös käytetyt lämpöanturit vaihdettiin digitaalisiin, jottei niitä varten tarvitse piirilevylle sijoittaa ADC-muuntimia. Näin saavutettiin mahdollisesti yksi piirilevykerros vähemmän, tai ainakin väljempi rakenne.

Lopputuloksena saatiin kaksikerroksinen Raspberry Pi:n päälle sopiva ohjauselektronikan ja jännitemuuntimet sisältävä kokonaisuus, joka on huomattavasti aiempaa prototyyppiä kompaktimpi. Korttipinoa voidaan myös helposti jatkaa ja liittää sen päälle Raspberry Pi:lle tarkoitettuja lisäkortteja, kuten GPS- ja mobiilidatortit. Kuvassa 15 nähdään käytössä oleva RPi:n päälle kasattu korttipino.



Kuva 15. Kalustetut piirilevyt liitettynä Raspberry Pi:hin, sekä antureihin ja toimilaitteisiin.

Lämpötilojen asettuminen lopullisiin arvoihin kesti noin kahdeksan minuutin ajan, joka on näin pieniä massoja säädettäessä huomattavan pitkä aika. Lämpötiloja ohjaavat PID-säädöt tulee siis jatkossa virittää paremmiksi, jotta luotettavia mittaustuloksia saadaan nopeammin.

Lähteet

- 1 INAR. 2019. Verkkoaineisto. Helsingin yliopisto. <<https://www.helsinki.fi/fi/inar-institute-for-atmospheric-and-earth-system-research>>. Luettu 27.4.2019
- 2 Hämeri, Kaarle & Mäkelä, Jyrki. 2005. Aerosolien mittaustekniikka
- 3 Thermal Mass Flow Working Principle, Theory and Design. Verkkoaineisto. Omega. <<https://sea.omega.com/tw/technical-learning/thermal-mass-flow-working-principle-theory-and-design.html>>. Luettu 9.4.2019.
- 4 Gurevich, Yuri & Velázquez-Pérez, Jesús. (2014). Peltier Effect in Semiconductors.
- 5 DC vs PWM. Verkkoaineisto. Meerstetter Engineering GmbH <<https://www.meerstetter.ch/compendium/peltier-element-efficiency#DC VS PWM>>. Luettu 10.4.2019.
- 6 Bielefeld, Rainer. 2004. Havainnekuva. [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]. Luettu 17.4.2019.
- 7 Vane pumps. Verkkoaineisto. Pumpschool. <<http://www.pumpschool.com/principles/vane.asp>>. Luettu 10.4.2019.
- 8 PID theory explained. Verkkoaineisto. National Instruments. <<http://www.ni.com/fi-fi/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>>. Luettu 13.4.2019.
- 9 Bräunl, T. 2006. Embedded robotics. 2. painos. Berlin, Heidelberg: SpringerVerlag.
- 10 Raspberry Pi 3: Specs, benchmarks & testing. Verkkoaineisto. Raspberry Pi Foundation. <<https://www.raspberrypi.org/magpi/raspberry-pi-3-specs-benchmarks>>. Luettu 2.4.2019.
- 11 GPIO. Verkkoaineisto. Raspberry Pi Foundation. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>>. Luettu 2.4.2019.
- 12 I2C info. Verkkoaineisto. I2C.info. <<https://i2c.info/>>. Luettu 2.4.2019.
- 13 Overview of 1-Wire Technology and Its Use. Verkkoaineisto. Maxim Integrated. <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1796>>. Luettu 2.4.2019.

- 14 DS18B20 datasheet. Verkkoaineisto. Maxim Integrated. <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Luettu 4.4.2019.
- 15 Wynne, John. 2009. Thermistor Senses Liquid Levels. Verkkoaineisto. <<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/thermistor-senses-liquid-levels.html>>. Luettu 4.4.2019.
- 16 Solid State Relay (Optical-coupled MOSFET) Structure and Features. Verkkoaineisto. Renesas Electronics Corporation. <<https://www.renesas.com/kr/en/products/optoelectronics/technology/architecture.html>>. Luettu 10.4.2019.
- 17 PCB capabilities. Verkkoaineisto. PCBWay. <<https://www.pcbway.com/capabilities.html>>. Luettu 11.4.2019.
- 18 PCB manufacturing process. Verkkoaineisto. PCBWay. <https://www.pcbway.com/blog/Engineering_Technical/PCBs_Manufacturing_Process.html>. Luettu 11.4.2019.