

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelu

2015

Joonas Karjalainen

LEVÄPOLTTOAINE- KASVATUSREAKTORIN AUTOMATISOINTI

– Testireaktorin elinolosuhteiden ylläpito



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkasuunnittelu

2015 | 21

Ohjaaja:TKT Timo Tolmunen

Joonas Karjalainen

LEVÄPOLTTOAINE-KASVATUSREAKTORIN AUTOMATISOINTI

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena suunnitella ja rakentaa Ledika Oy:lle laite, joka automatisoi yrityksen käyttämän testireaktorin. Testireaktoria käytetään bioöljyä tuottavien mikrolevien kasvatukseen ja niiden tutkimiseen. Jotta levän kasvusta saadaan tehokasta, pitää reaktorin pH:ta ja lämpötilaa jatkuvasti mitata ja säädellä. Tämän tekeminen käsin on kuitenkin työlästä ja aikaa vievää.

Opinnäytetyön aikana selvitettiin, miten reaktorin automatisointi toteutetaan. Lopulta päädyttiin käyttämään ohjaukseen mikrokontrolleria, jota käyttäjä pystyy säätämään tietokoneella olevalla ohjelmalla. Työssä otettiin huomioon myös yrityksen tulevat jatkokehitystarpeet.

Opinnäytetyön tuloksena oli laite, joka pystyy säätämään testireaktorin elinolosuhteita tarkasti sekä keräämään muistiin tietoa pitkiltäkin testikerroilta.

ASIASANAT:

pH, bioöljy, mikrolevä

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Design

2015 | 21

Instructor: Timo Tolmunen, D.Sc(Tech)

Joonas Karjalainen

AUTOMATISATION OF ALGAL FUEL GROWTH REACTOR

Purpose of this thesis was to design and build a device for Ledika Oy that would control growth reactor used by this company. The growth-reactor is used to grow and study microalgae that produce bio-oils. In order for microalgae to grow efficiently pH and temperature of the reactor must be measured and controlled constantly. Doing this by hand, however, is cumbersome and time-consuming.

Research carried out on how to realize this device. Eventually it was decided that a microcontroller would be good solution for controlling the reactor. A PC-application was also build so that user could control the device. Future needs of the company were also taken into account when developing the device.

The result of thesis was a device that could control living conditions of test reactor precisely and save measured data even from longest of test-runs.

KEYWORDS:

pH, bio-oil, microalgae

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
2 BIOPOLTTOAINE	2
2.1 Kasviöljyt	3
2.2 Mikrolevät	3
3 TESTIREAKTORI	5
4 LAITTEISTO	6
4.1 pH-anturin toimintaperiaate	6
4.2 pH-anturin vastaanottimen toimintaperiaate	8
4.3 Lämpöanturi ja lämmitin	8
4.4 Releet ja relekortti	9
4.5 Pinnankorkeuden mitta	10
4.6 Sekoitin	11
4.7 RTC	12
4.8 USB to Serial-muunnin	13
4.9 käyttöliittymä	13
5 OHJELMISTO	16
5.1 pH:n mittaus ja ohjaus.	16
5.2 Lämpötilan mittaus ja ohjaus	17
5.3 Pinnankorkeuden mittaus ja ohjaus	17
5.4 Datan tallennus	18
6 TULOKSET JA POHDINNAT	19
6.1 Kehityksen ongelmat ja ratkaisut	20
6.2 jatkokehitys	21
7 YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

KÄYTETYT LYHENTEET

FAME	Rasvahapon metyyliesteri. Biodieselistä puhuttaessa tarkoitetaan yleensä FAME:a
I2C	Sarjamuotoinen väylä
ROM	Lukumuisti
RTC	Patterilla toimiva kellopiiri
SPI	Synkronoidun sarjakommunikoinnin käyttöliittymä

1 JOHDANTO

Nestemäisten biopolttoaineiden historia alkaa 1800-luvun lopusta, kun ensimmäisiä bensiini- ja dieselmootoreita alettiin kehittää. Saksalainen Rudolf Diesel patentoi kehittämänsä dieselmootorin vuonna 1893, joka jo silloin oli suunniteltu toimimaan biodieselillä. Tähän patenttiin perustuen Henry Ford alkoi tuottamaan autoja vuonna 1903, jotka nekin toimivat hampusta tehdyllä polttoaineella. Myöhemmin fossiilisten polttoaineiden keksiminen ja niiden runsaasta tarjonnasta johtuva halpa hinta syrjäytti biopolttoaineet teollisuudesta. Nyt, reilut 100 vuotta myöhemmin, epävarma fossiilisten polttoaineiden hinta, sekä ilmastonmuutos on herättänyt uudestaan kiinnostuksen biopolttoaineisiin ja niiden kehittämiseen. [1]

Biopolttoaineiden kasvatukseen liittyviä opinnäytetöitä on jo olemassa, mutta lähes kaikki niistä tulevat kemian- ja biotekniikan koulutusohjelmista. Tästä syystä ne käsittelevät lähinnä itse kasvatusprosesseja ja menetelmiä, eivätkä niiden automatisointia. Elektroniikan harrastajat ovat sen sijaan tehneet paljon yksittäisiä projekteja, jotka usein liittyvät esimerkiksi kasvien elinolosuhteiden säätelyyn. Näissä projekteissa esiintyviä ideoita käytettiin apuna myös tätä opinnäytetyötä tehtäessä.

Tässä työssä keskityttiin biopolttoainetta tuottavien mikrolevien kasvatukseen. Kasvatus on vasta ensimmäinen vaihe moottoreihin kelpaavan biopolttoaineen valmistuksessa, muita vaiheita ovat esimerkiksi polttoaineen erotus ja kuivaus. Kasvatus on kuitenkin tärkein osa prosessia, sillä se, mitä kasvatuksen aikana tapahtuu, vaikuttaa eniten lopullisen tuotteen hyötysuhteeseen. Tämän takia on tärkeää, että kasvuympäristö on hyvin valvottu ja kontrolloitu.

2 BIOPOLTTOAINE

Polttoaineiksi tarkoitetuille aineille on asetettu standardeja, jotta eri valmistajien polttoaineet sopivat samoihin koneisiin. Standardit määrittelevät myös polttoaineen laadun, esim. kuinka paljon polttoaineessa saa olla rikkiä tai mikä sen jäätymispiste on. EU:ssa käytetty polttoöljy noudattaa EN 590 -standardia. Tämän lisäksi polttoöljyä vastaavalle biopolttoaineelle on säädetty EN 14213 -standardi, sekä ajoneuvoihin sopivan biopolttoaineen EN 14214 -standardi. Ne määrittelevät vaatimukset sekä testausmenetelmät biopolttoaineille, tai tarkemmin FAME:lle. Kyseisen standardin vaatimuksia on esillä taulukossa 1. Ledika Oy:n tavoitteena on kehittää EN 14214- ja EN 14213 -standardin täyttävä biopolttoaine. [2]

Taulukko 1. Osa standardin EN 14214 määrittelemistä biodieselin ominaisuuksista [2]

	yksikkö	alaraja	yläraja
Esteripitoisuus	% (m/m)	96,5	—
tiheys 15 °C:ssa	kg/m ³	860	900
Viskositeetti 40 °C:ssa	mm ² /s	3,5	5,0
Leimahduspiste	°C	>101	—
Rikkipitoisuus	mg/kg	—	10
Sulfaattihukka-pitoisuus	% (m/m)	—	0,02
Vesipitoisuus	mg/kg	—	500
Saasteiden kokonaispitoisuus	mg/kg	—	24
kuparin syövyttävyys (3 tuntia 50 °C:ssa)	luokka	luokka 1	luokka 1
hapettuminen, 110 °C	tuntia (h)	8	-
Fosforipitoisuus	mg/kg	-	4

2.1 Kasviöljyt

Teoriassa kaikkia kasveja jotka sitovat hiiltä itseensä kasvaessaan, on mahdollista käyttää biopolttoaineiden valmistukseen. Käytännössä asiaa vaikeuttaa kuitenkin mm. kasvin rakenne, kasvunopeus ja hiilen määrä, jonka mitä kasvi sitoo itseensä suhteessa sen muuhun massaan. Teollisuudessa onkin yleistyneet tietyt lajit, kuten palmu, papu, soija ja maissi. Kasveista voidaan myös tuottaa paljon erityyppisiä polttoaineita, kuten etanolia, biokaasua tai biodieseliä.[3]

Biopolttoaineen hintaan vaikuttaa pääasiassa sen kasvatuksesta johtuva hinta. Tämä on ollut suurin syy miksi kasviöljyt eivät pystyneet kilpailemaan fossiilisten polttoaineiden kanssa. Esimerkiksi vuonna 2006 dieselin litrahinta Yhdysvalloissa oli ennen veroja noin 0,49 \$/l, kun taas palmuöljystä valmistetun biodieselin hinta oli silloin n. 0,66 \$/l. Lisäksi kasveista valmistettu polttoaine vaatii viljeltäväksi kelpaavaa maata. Esimerkiksi palmuöljy, joka on hyötysuhteeltaan yksi parhaimmista kasveista valmistetuista biodieselin lähteistä, tuottaa 5950 l/ha vuodessa. Tämä maa-ala on pois ruuan tuotannosta, mikä aiheuttaa eettisiä ongelmia ruoantuotantoon. [3]

2.2 Mikrolevät

Energian tuotannon kannalta mikrolevillä on selviä etuja verrattuna kasveista valmistettuihin polttoaineisiin. Ensinnäkään ne eivät vaadi läheskään niin paljon tilaa kuin viljeltävät kasvit. On laskettu että mikrolevillä voitaisiin tuottaa öljyä jopa 136 900 l/ha. Kos tätä vertaa aiemmassa luvussa mainittuun palmuöljyyn (5950 l/ha), ero on huomattava, eikä siten vaaranna ruuan tuotantoa. Toiseksi mikrolevät eivät ole yhtä herkkiä sään muutoksille, varsinkin jos kasvatukseen käytetään mikrolevää, joka ei vaadi auringonvaloa kasvaakseen. Tämä mahdollistaa tuotannon myös sellaisilla alueilla, joissa auringonvaloa on saatavilla vähän, olettaen että ravinteita on saman verran saatavilla. Kolmanneksi eduksi voidaan laskea mikrolevien kasvunopeus verrattuna kasvien vuosittain tapahtuvaan kasvukausiin: keskimäärin reaktorin biomassa kykenee kaksinkertaistumaan vuorokauden aikana, ja kasvun ollessa nopeimmillaan kaksinkertaistuminen voi tapahtua jo 3,5h aikana. Mikrolevillä tuotetun öljyn hintaa on vielä vaikea arvioida, sillä sen tuotanto suuressa mittakaavassa on vasta alkamassa. [3]

Mikrolevät ovat yksisoluisia, ja vaihtelevat kooltaan muutamasta mikrometristä aina useaan sataan mikrometriin, lajista riippuen. Erilaisia mikrolevälajeja on arvioitu olevan noin 200 000–800 000. Mikrolevät voidaan lajitella kolmeen luokkaan sen mukaan, miten ne käyttävät ympärillään olevia ravinteita kasvaakseen: autotrofisiin, mixotrofisiin ja heterotrofisiin. [4]

Autotrofiset organismit pystyvät käyttämään ravinnokseen epäorgaanisia aineksia, kuten hiilidioksidia. Usein autotrofiset eliöt käyttävät valon avulla tapahtuvaa yhteyttämistä kasvaakseen. Heterotrofiset organismit taas kykenevät käyttämään hyödykseen pelkästään orgaanisia aineksia, kuten sokereita, lipidejä tai proteiineja. Heterotrofiset levät eivät välttämättä tarvitse valoa kasvaakseen. Mixotrofiset organismit kykenevät käyttämään sekä epäorgaanisia että orgaanisia aineksia kasvaakseen. Osa mixotrofisista organismeista kykenee myös käyttämään valoa kasvaakseen. [4]

Tätä työtä tehdessä kasvatukseen käytettiin *Chlorella protothecoides*-nimistä mikrolevää. Kyseinen levä ei tarvitse auringon valoa, vaan se saa kasvuunsa tarvitsemansa energian sen ympärillä olevista orgaanisista yhdisteistä, esim. sokerista. Kyseessä on siis heterotrofinen levä. Yleensä öljyn tuotannossa käytetyt mikrolevät ovat fototrofisia, eli ne vaativat auringonvaloa kasvaakseen, mutta *Chlorella protothecoides* viihtyy myös pimeässä [5]. Itseasiassa tärkeimmät syyt pimeässä kasvatukseen ovat paljon pienempi tilantarve verrattuna isoihin kasvatusaltaisiiin, auringon valon vähäinen määrä Suomen alueella, sekä tuotetun biomassan määrä verrattuna valon avulla kasvatettuun. Aiemmissa tutkimuksissa kyseisellä levällä on kasvun päätyessä laskettu solutiheydeksi parhaimmillaan $70,9 \text{ g/l}^{-1}$ ($70,9 \text{ kg/m}^3$). Kun tämä massa kuivataan sen öljypitoisuus on parhaimmillaan jopa 55 %. Valon avulla kasvatettuihin soluihin verrattuna on tämä määrä jopa nelinkertainen [6].

3 TESTIREAKTORI

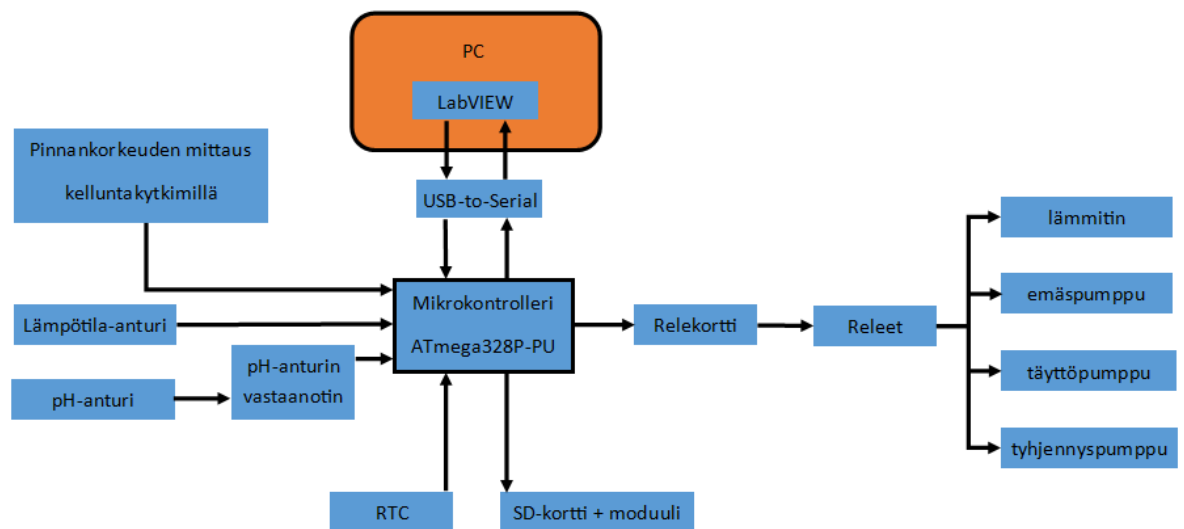
Jotta biopolttoaineen valmistus olisi kannattavaa täytyy kasvatuskertojen tuottama levämäärä olla suuri, mikä vaatii tietenkin suuret kasvatusreaktorit. Tässä työssä kuitenkin keskityttiin testaamaan levän kasvua pienemmässä mittakaavassa, koska tavoitteena oli tuotannon sijaan leväkasvun tutkiminen. Tähän tarkoitukseen valittiin 15 l säiliö. Ongelmaksi kuitenkin muodostui pH:n säätely, sillä kasvun aikana tapahtuvaa pH:n laskua piti jatkuvasti kompensoida lisäämällä emäsluosta, lisäksi kaikki muutokset kasvun aikana, esimerkiksi pH:n muutos, piti käsin kirjoittaa muistiin. Tämä johti siihen että kasvatuskerrat olivat niin pitkiä, kuin testaaaja itse jaksoi paikalla olla. Työn tarkoituksiksi tuli siis toteuttaa elinolosuhteiden säätelyn automatisointi kyseisessä testausreaktorissa, sekä tiedon keruu kasvatuksen aikana.

Kasvatuksessa käytetty levä, *Chlorella protothecoides*, vaatii kasvaakseen lämpimän ja pH:ltaan sopivan, nestemäisen ympäristön. Kyseinen levä viihtyy hyvin hieman happamassa, noin 6,8 pH:n ympäristössä. Kasvaessaan levä tuottaa sivutuotteena ympäristöönsä happamia aineksia, jolloin reaktorin pH lähtee laskemaan. Mikäli pH laskee liikaa, alkaa levän kasvu heiketä, joten happamuutta tulee kontrolloida emäslisäyksen avulla.

Kasvun aikana nestettä tulee sekoittaa, jotta reaktorin ravinteet ja lämpö jakautuisivat tasaisesti. Lisäksi pH:n arvo vaihtelee sekoittamattomassa reaktorissa, jolloin on hankala arvioida tarvitseeko pH:n arvoa muuttaa säätelemällä. Sekoitus voidaan toteuttaa monella tapaa, kunhan se ei ole liian voimakasta, sillä liian voimakas sekoitus rikkoo levän solun, jolloin kasvu sen solun osalta päättyy. Sekoitettaessa täytyy myös ottaa huomioon, miten neste virtaa säiliössä ja jääkö säiliöön kohtia, joissa virtaus on heikko tai olematon.

4 LAITTEISTO

Työhön käytettävien komponenttien valintaa ohjasi pääasiassa komponenttien hinta, ja se että rikkoutuvan komponentin pystyy tarvittaessa helposti vaihtamaan. Nämä valinnat näkyvät lopullisessa työssä siten, että jokainen alla mainituista moduuleista on helposti vaihdettavissa. Taivottu halpa hintakin toteutui, koska lopulliselle tuotteelle syntyi kustannuksia alle 500 euroa.



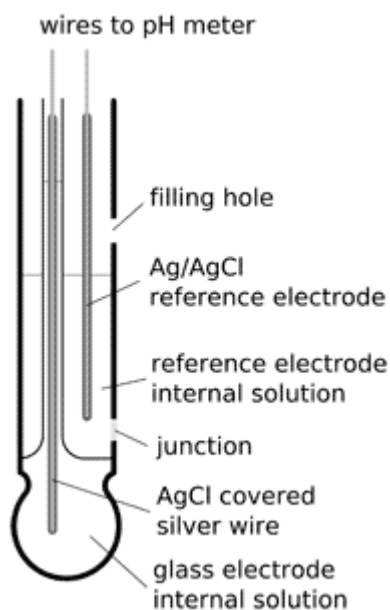
kuva 1. lohkokaavio laitteen osista. Nuolet osoittavat datan liikkumisen suunnan.

4.1 pH-anturin toimintaperiaate

pH:n mittaamista varten on olemassa useita eri tapoja, vaihdellen aina väriuskoista valon aallonpituuden mittaamiseen. Tässä työssä kuitenkin käytettiin halpaa ja laajasti levinyttä kombinaatioelektrodia. Kombinaatioelektrodi muodostuu referenssielektrodista ja erityisestä pH-herkästä lasista, jonka sisällä on esimerkiksi hopeasta tehty elektrodi. Kumpikin elektrodi on toisistaan eristetty ja upotettu pH-neutraaliin aineeseen kuten kaliumkloridi-liuokseen. Lisäksi referenssielektrodi on eristetty mitattavasta liuoksesta siten että se sallii kuitenkin elektronien virran niiden välillä (metallinen eristys).

pH-asteikko on tehty kuvaamaan vetyionien (H^+) määrää liuoksessa, missä suurempi vetyionien määrä tarkoittaa matalampaa pH-arvoa. Asteikko on jaettu 14 osaan, jossa yksikkö 7 tarkoittaa neutraalia liuosta, ja se vastaa pH:n osalta puhdasta vettä. pH:n laskiessa alle 7:n on liuos silloin hapan, kun taas pH nousee yli 7 on liuos silloin emäksinen. pH-asteikko on logaritminen, eli kun vetyionin määrä muuttuu kertoimella 10 muuttuu pH yhden yksikön verran.

Kun anturin päässä oleva pH-herkkä lasi upotetaan mitattavaan liuokseen alkaa liuoksessa olevat positiiviset vetyionit tunkeutua lasin pinnassa olevaan ”geelikerrokseen”. Tästä aiheutuu lasin sisäpinnalla tapahtuva samanlainen reaktio. Saatavilla olevien vetyionien määrä riippuu suoraan liuoksen pH:sta; mitä happamampi liuos on sitä enemmän siinä määrältään vapaita vetyioneja. Kun vetyionit kertyvät lasin sisä- ja ulkopintaan happamassa liuoksessa ulkopintaan kertyy enemmän ioneja kuin sisäpintaan, jolloin lasikalvon väliin syntyy positiivinen jännite-ero $V_{\text{ulko-sisä}}$. Jos taas sisäpuolella on ioneja saatavilla enemmän on ulkopuolinen liuos emäksinen, jolloin $V_{\text{ulko-sisä}}$ saa negatiivisen arvon. Jos vetyionien määrä on sama kummassakin aineessa ei varausta synny ja mitattava neste on siten pH:n osalta neutraali. Tätä jännite-eroa mittaamalla voidaan laskea pH:n arvo.



Kuva 2. poikkileikkaus tyypillisestä kombinaatioelektrodista [7].

4.2 pH-anturin vastaanottimen toimintaperiaate

Anturilta saatava jännite-ero riippuu valmistajan valitsemista elektrodin valmistusmateriaaleista, anturin sisällä olevan aineksen koostumuksesta, sekä pH-herkän lasin rakenteesta. Näitä eroja pystytään kuitenkin kompensoimaan vastaanottimen ja ohjelman avulla toteutetun mittapään kalibroinnin avulla. Taulukossa 2 on esitetty yhden työssä käytetyn pH-anturin SKU: SEN0161:n jännitteet verrattuna mitattuun pH:n arvoon.

Taulukko 2 Anturin SKU: SEN0161 arvot jännitteestä pH:n suhteen [8]

Jännite (mV)	pH-arvo	Jännite(mV)	pH-arvo
414,12	0,00	-414,12	14,00
354,96	1,00	-354,96	13,00
295,80	2,00	-295,80	12,00
236,64	3,00	-236,64	11,00
177,48	4,00	-177,48	10,00
118,32	5,00	-118,32	9,00
59,16	6,00	-59,16	8,00
0,00	7,00	0,00	7,00

Vastaanotin siis saa anturilta arvoja jotka vaihtelevat välillä $-414,2$ mV ja $414,2$ mV. Nämä arvot vastaanotin muuntaa siten, että $-414,2$ mV aiheuttaa vastaanottimen ulostuloon 0 V jännitteen ja $414,2$ mV taas 5 V jännitteen. Ulostulos on kytketty mikrokontrollerin pinniin, josta ohjelma lukee kyseisen jännitteen ja tulkitsee sen tietyksi pH:n arvoksi.

4.3 Lämpöanturi ja lämmitin

Työssä käytettiin digitaalista Lämpötila-anturia nimeltä DS18B20. Sen tarkkuudeksi on määritetty $\pm 0,5$ °C lämpötilan ollessa -10 °C ... $+85$ °C välillä. Anturi pystyy kuitenkin mittaamaan lämpötiloja väliltä -55 °C ... $+125$ °C. Tähän työhön anturi sopii hyvin, sillä lämpötilan vaihtelu suu-

rimmillaan on arviolta 0 °C ... 40 °C välillä. Kyseinen anturi on koteloitu vesitiiviiseen ja syövyttäviä aineita kestäväan metallikoteloon. Anturissa on 3 pinniä: maa, käyttöjännite ja datalinja. Siitä löytyy myös erikoisominaisuutena 1-Wire®-teknologia, joka sallii käyttöjännitteen oton datalinjan kautta. Jokaisessa anturissa on lisäksi oma sisäinen ROM, johon on tallennettu anturikohtainen 64-bittinen sarjanumero. Tämän sarjanumeron ansiosta useita antureita pystytään kytkeämään rinnakkain samaan datalinjaan, mikäli lämpötilaa halutaan mitata useammasta kohteesta, tai käyttää muita laitteita jotka tukevat 1-Wire-teknologiaa. [9]

Lämmittimenä käytettiin verkkovirralla toimivaa akvaariolämmitintä. Kyseisestä lämmittimestä löytyy käsin säädettävä lämpötilan säätö. Lämmön säätely voidaan siis tehdä joko käsin suoraan lämmittimestä, tai tietokoneen kautta. Jatkokehitystä ajattelen tietokoneella tehtävä säätö on parempi vaihtoehto, jos lämpötilaa halutaan muuttaa esimerkiksi ajan tai kasvun nopeuden suhteen.

4.4 Releet ja relekortti

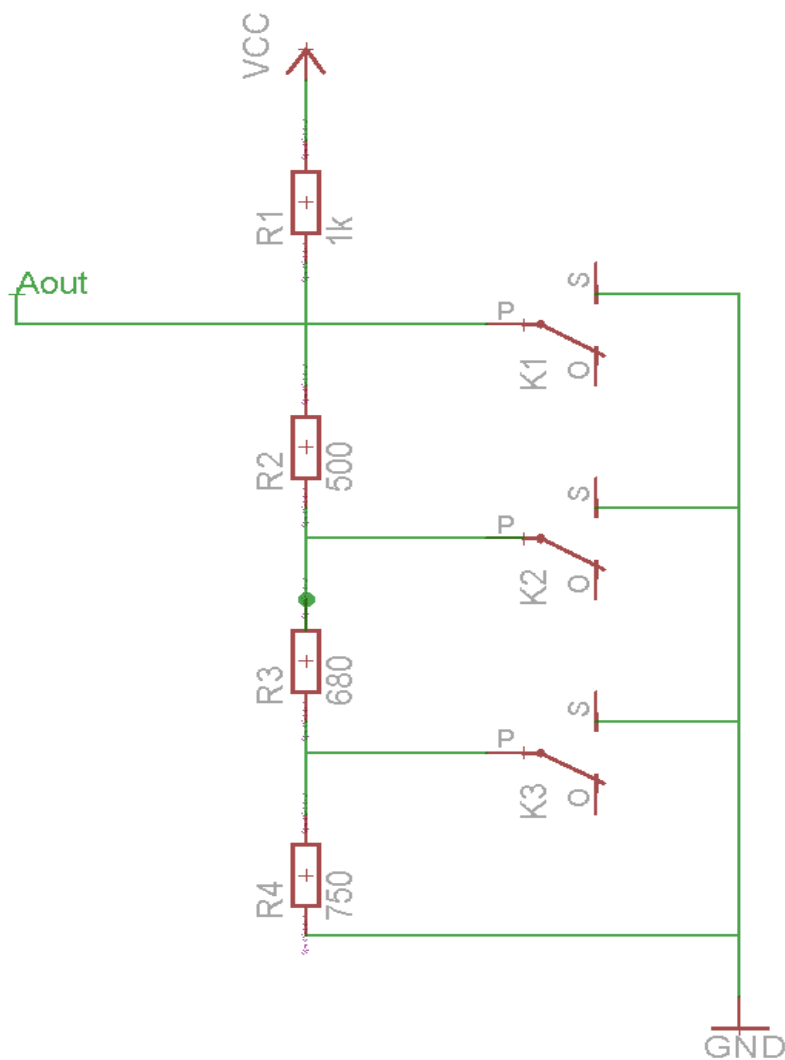
Työssä käytettävät pumput ja lämmitin toimivat pistokkeesta saatavalla 230 V:n verkkovirralla. Näitä laitteita ohjataan verkkovirtaa kestävillä kaksipuoleisilla releillä. Tässä työssä releiksi valittiin rele MI-SH-206, sekä siihen sopiva relekanta. Kyseinen rele kestää 5 A:n virran, ja sen ohjausjännitteenä toimii 5 V:n tasavirta. Relekanta nähtiin tarpeelliseksi, sillä se vähensi asennustyön määrää, sekä sallii rikkoutuneen releen helpon vaihtamisen, mikä ei piirilevyllä tehtynä olisi mahdollista.

Kyseiset releet vaativat n. 30 mA:n verran virtaa jotta rele kytkeytyy päälle. Mikrokontrolleri ei kuitenkaan pysty niin paljoa virtaa yhdestä pinnistä antamaan, joten virtaa vahvistettiin transistoreilla. Transistorit sijoitettiin erilliselle piirilevyllä. Tietokoneen USB-liitimestä virtaa saa USB 2.0 standardin mukaan maksimissaan 500 mA, kun jännite on 5 V. Teoriassa tämä määrä riittää releiden päällekytkemiseen, mutta käytännössä releen sisällä oleva kela vaatii hetkellisesti käynnistyessään paljon enemmän tehoa kuin mitä useimmat tietokoneiden virtapiirit kykenevät antamaan. Kun releitä testattiin käyttäen teholähteenä pelkästään tietokoneen USB-porttia aiheutti se sekä mikrokontrollerin ja tietokoneen kaatumista. Tämän takia laite käyttää erillistä 5 V virtalähdettä. Erillisen virtalähteen ansiosta ei laiteen tarvitse myöskään olla jatkuvasti kiinni tietokoneessa.

4.5 Pinnankorkeuden mittaus

Pinnankorkeuden mittauksesta huolehtii 3 kelluntakytkintä jotka on aseteltu reaktorin pohjaan, keskivaiheille ja korkeuteen jossa pinnankorkeus saa enimmillään olla. Kelluntakytkimellä on 2 eri asentoa, joista toinen aiheuttaa kytköksen kytkimestä ulostuleviin 2 johtimeen, toinen tila taas katkaisee kytköksen. Kytkimen päässä oleva kelluke nousee ja laskee vedenpinnan mukaan, kytkien johtimet yhteen tai erilleen toisistaan, riippuen kummin päin kelluntakytkin on asennettu. Kelluntakytkimiä yhdistää kuvassa 3 oleva piiri, joka jännitteenjaon avulla ilmoittaa mikrokontrollerille pinnankorkeuden. Kytkennän ansiosta pinnankorkeuden mittaamiseen tarvitaan vain yksi mikrokontrollerin analogiapinni.

Opinnäytetyön tekemisen aikana pinnankorkeuden mittausta testattiin erillään muusta reaktorista, mutta se todettiin toimivaksi. Testireaktorissa sitä ei kuitenkaan tarvittu sillä ainoat pinnankorkeutta muuttavat tekijät olivat nesteen haihtuminen sekä emäliuoksen lisäys. Nämä muuttajat yksinään eivät aiheuta leväkasvulle vaaraa. Mikäli reaktori sattuu kaatumaan tai vuotamaan, ei 15 l:n säiliö aiheuta vesivahingon vaaraa. Tulevaisuudessa rakennettavassa isommassa kasvatusreaktorissa pinnankorkeuden mittausta tulee oleellisemmaksi. Silloin mikrokontrolleri voidaan esimerkiksi ohjelmoida käynnistämään tyhjennyspumpun, mikäli pinnankorkeus nousee liikaa, tai vaikkapa hälyttämään työntekijän paikalle, jos pinnankorkeus laskee liian alas.



Kuva 3. Kytentäkaavio jännitteenjaon tekevästä kytkennästä. K1, K2 ja K3 kuvaavat kellunta-kytkimiä.

4.6 Sekoitin

Kasvunesteen sekoitin toteutettiin reaktorin pohjaan asennetulla ilmapumpulla, joka pumppaa nesteen sekaan runsaasti ilmakuplia, mikä aiheuttaa kasvunesteen tehokkaan sekoittumisen. Koska nestettä pitää jatkuvasti sekoittaa, ei pumppua tarvinnut säädellä mikrokontrollerilla, vaan se on jatkuvasti päällä silloin kun kasvatusta tehdään.

4.7 RTC

Mikrokontrollerin tallentaessa dataa SD-kortille pitää kortille myös tallentaa aika jolloin yksittäinen mittausta on tehty. Mikrokontrolleri kykenee mittaamaan kulunutta aikaa kellonpulssein avulla, jonka se saa sen pinneihin kytketystä kellokitekistä. Kellopulssein avulla mikrokontrolleri säätää koodiin merkittävät ajastuksia, esimerkiksi pumppujen päälläoloaikoja, tai SD-kortille tallentamista. Mikrokontrolleri pystyy myös ilmaisemaan aikaa ja päivää.

Kaiken tämän mikrokontrolleri pystyy tekemään, olettaen että se saa jatkuvasti virtaa. Ongelmaksi nimittäin muodostuu tilanne jossa mikrokontrollerista jostain syystä katkeaa virta. Koska lopullista laitetta tullaan käyttämään maaseudulla, missä esimerkiksi ukkonen tai myrsky katkovat sähköjä, pitää kyseinen ongelma ottaa huomioon. Sähköjen katketessa mikrokontrolleri menettää laskemansa ajankohdan ja nollaantuu seuraavan käynnistyskerran yhteydessä. Kun laite kytketään takaisin päälle jatkuu reaktorin säätely normaalisti, mutta SD-kortille tallentuva aika on väärä. Ongelma tulee ilmi, kun väärin tallennettu data piirretään Excelin avulla, sillä kuvaajaan ei silloin piirry oikein aika jolloin laite on ollut pois päältä. Lisäksi kellonaikoihin tulee päällekkäisyyksiä.

RTC eli Real Time Clock on mikrokontrolleri kiinnitettävä erillinen piiri, joka laskee jatkuvasti siihen ohjelmoitua kellonaikaa ja päivämäärä. RTC kykenee mittaamaan aikaa, vaikka laite jossa se on kiinni sammutetaan, sillä silloin RTC siirtyy käyttämään siihen kytkettyä 3,6 V nappiparistoa. RTC on suunniteltu käyttämään erittäin vähän virtaa (alle 500 nA), kun se on pariston varassa. Tästä johtuen laite voi olla pitkiäkin aikoja pois käytöstä ilman että laitteen aika vääristyy. RTC:n avulla mikrokontrolleri saa aina oikean tiedon kellonajasta kun laite käynnistetään. Tämän ansiosta SD-kortille tallentuvat tiedot kellonajasta pysyvät myös oikeina. Laitteen prototyyppiä testattaessa RTC:stä oli usein apua vikojen etsinnässä, sillä SD-kortilta näki suoraan milloin mikrokontrolleri on mennyt jumiin, tai tehnyt säätämistä väärin.

4.8 USB to Serial–muunnin

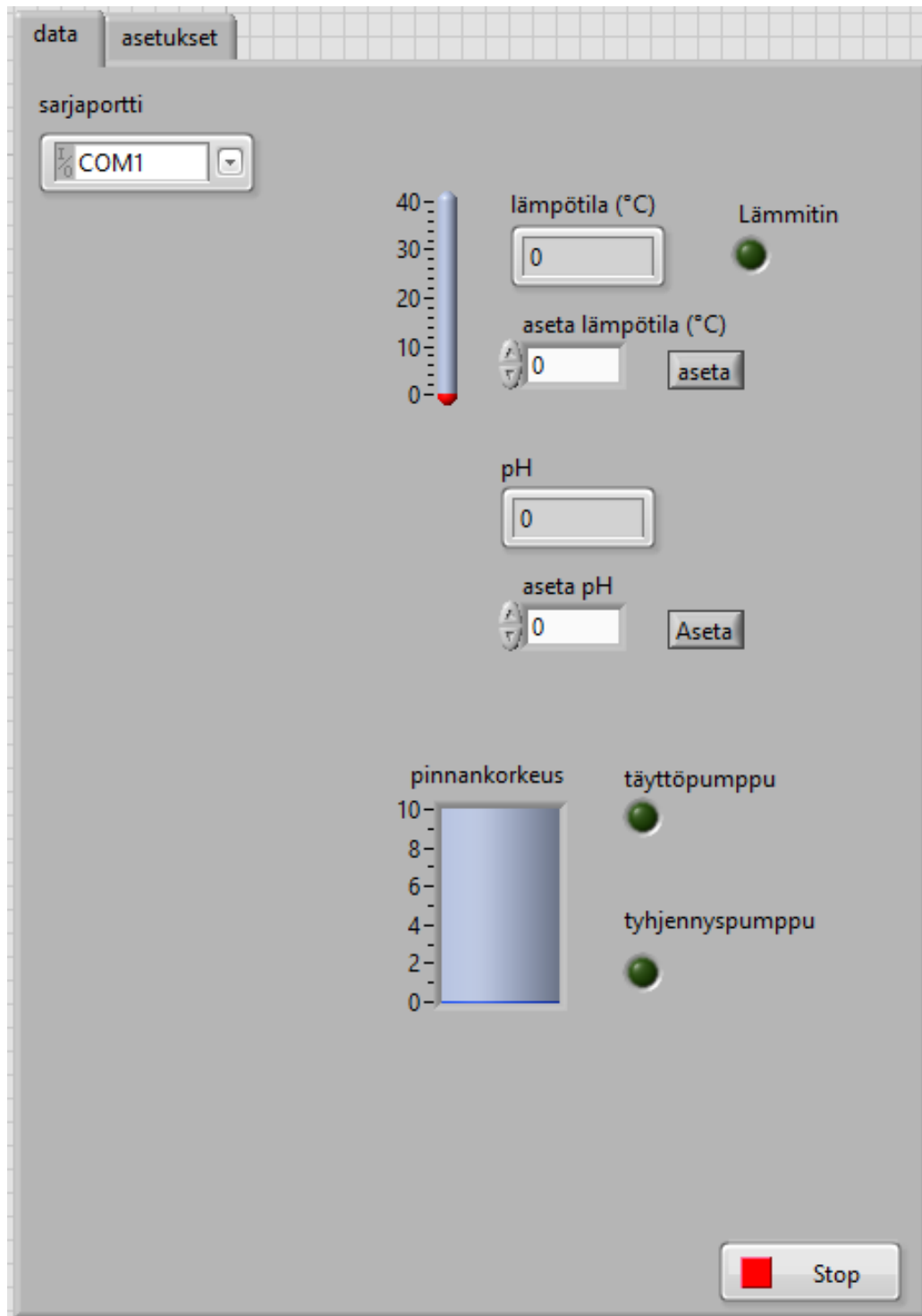
Atmega328:sta löytyy kaksi pinniä, joiden avulla voidaan toteuttaa sarjakommunikointi muiden sarjakommunikointia tukevien laitteiden kanssa. Sarjakommunikointi on melko yksinkertainen, kahden linjan kommunikointitapa, jossa lähetettävälle ja vastaanotettavalle datalle on oma linja. Dataa siirretään bitti kerrallaan, mistä sarjakommunikointi on saanutkin nimensä. Sarjakommunikointia on käytetty aiemmin paljon esimerkiksi tietokoneissa tai modeemeissa, mutta sen käytöstä on nykyään luovuttu sen rajallisen tiedonsiirtonopeuden takia. Sarjaporttien tilalla käytetään nykyään esimerkiksi USB:tä. Tässä työssä sarjakommunikointi tiedonsiirtonopeuden suhteen on toimiva ratkaisu, koska tietokoneen ja mikrokontrollerin välillä liikkuvan datan määrän on vähäinen.

Koska uusista tietokoneista ei enää sarjaporttia siis löydy, käytettiin mikrokontrollerin ja tietokoneen välissä muunninta joka muuntaa mikrokontrollerilta tulevan sarjamuotoisen datan USB:tä tukevaan muotoon ja päinvastoin. Muunnin ostettiin valmiina, joten sitä ei siten tarvinnut itse ohjelmoida. Kyseinen muunnin käyttää yleistä USB Mini-liitintä.

4.9 käyttöliittymä

Työtä tehdessä ensimmäinen idea oli toteuttaa käyttöliittymä käyttäen pientä, noin 4 tuuman nestekidenäyttöä. Sitä toteuttaessa kuitenkin huomattiin, että käyttöliittymän järkevä suunnittelu sekä näyttöä ohjaava koodi olisi erittäin haasteellista ja aikaa vievää. Siksi käyttöliittymän toteutukseen alettiin etsiä vaihtoehtoisia toteutustapaa. Tietokoneella käytettävä käyttöliittymä toteutettiin loppujen lopuksi LabVIEW-nimisellä ohjelmistonkehitys-ohjelmalla. LabVIEW-ohjelman avulla on helppo toteuttaa erilaisia mittauslaitteita, sekä automatisoituja järjestelmiä. Vaikka ohjelman käytöstä ei ollutkaan ennen työn tekemistä aiempaa kokemusta onnistui toimivan käyttöliittymän rakentaminen silti parissa viikossa.

Käyttöliittymästä pystyy nopeasti näkemään reaktorin lämpötilan, pH:n ja pinnankorkeuden. pH:n ja lämpötilan arvo otetaan suorina mittausarvoina, toisin kuin SD-kortille tallentuvat keskiarvot. Tämän ansiosta esimerkiksi emäspumpun tai ravinnepumpun toimintaa ja vaikutusta voidaan reaaliaikaisesti seurata.



Kuva 4. Laitteen käyttöliittymä

Käyttöliittymän avulla säädetään tavoitearvot lämpötilalle ja pH:lle. Uusi arvo kirjoitetaan siihen osoitettuun osioon, ja painetaan "asetta"-painiketta. Tämän jälkeen tallennettu arvo lähetetään ja tallennetaan mikrokontrollerin omaan muistiin. Näiden lisäksi kyseisen ohjelman avulla tehdään pH-anturin ja lämpötila-anturin kalibrointi. Nämä kalibroinnit tehdään "asetukset"-välilehdessä. Lämpötila-anturi kalibroidaan kirjoittamalla todellinen lämpötila jossa laitteen lämpötila-anturi sillä hetkellä on.

pH-anturin kalibrointi tehdään asettamalla anturi 7 pH:n vahvuiseen liuokseen, annetaan arvon tasaantua, jonka jälkeen kirjoitetaan arvo "7" kalibrointia varten osoitettuun tekstiosioon ja painetaan "asetta"-painiketta. Tämän jälkeen pH-anturi puhdistetaan vedellä, kuivataan ja asetetaan 4 pH:n vahvuiseen liuokseen. Seurataan kuinka lähelle pH asettuu lukua 4 ja säädetään mahdollinen ero pois kääntämällä piirilevyllä olevaa potentiometriä. Tällaisen kaksiosaisen kalibroinnin ansiosta laitteessa pystyy käyttämään useiden eri valmistajien pH-antureita joissa on BNC-liitin, sekä kompensoimaan pH-anturin luonnollisesta kulumisesta johtuvaa vääristymää.

5 OHJELMISTO

Ohjelmointi toteutettiin Arduino IDE-nimisellä ohjelmalla. Kyseinen ohjelma on ilmainen, avoimeen lähdekoodiin perustuva ohjelmointialusta. Ohjelman etuihin lukeutuu sen laaja käyttäjäkunta, ja siten se omaa monipuolisen tukiverkoston, mikäli ohjelmoitaessa nousee esiin ongelmia. Arduinon levinneisyyden ansiosta sille on rakennettu useita yhteensopivia sensoreita, vastaanottimia, lähettäjiä, yms. Mikä helpottaa työhön vaadittavien osien etsintää huomattavasti [10].

Tässä työssä mikrokontrollerina käytettiin Atmega328P-PU:ta. Se on Atmelin valmistama 8-bit-tinen mikrokontrolleri, jossa on oma sisäinen 32 kB:n muisti. Kyseistä kontrolleria käytettiin, koska siinä on 23 I/O-pinniä (sensoreita ja releitä varten) sekä SPI- ja I2C-pinnit sarjakommunkointiin ja RTC:tä varten.

5.1 pH:n mittaus ja ohjaus.

pH:n mittaus tehdään yhden Arduinon analogiapinnin avulla. Tähän pinniin tuodaan analoginen signaali (väliltä 0 V ...5 V). Tämä signaali saadaan pH-moduulista, johon pH-anturi on kiinnitetty. Mikrokontrolleri mittaa ja tallentaa pH:ta noin 1 s välein. Joskus tallennuksen väli voi vaihdella hieman, johtuen mikrokontrollerin toimintaa hidastavista tekijöistä, kuten SD-kortille tallentamisesta, tai jos käyttäjä muuttaa esimerkiksi tavoitelämpötilaa. Nämä hidasteet ovat kuitenkin merkityksettömiä itse säätelyn kannalta, koska merkittävät pH:n muutokset tapahtuvat n. 30 s, tai sitä hitaammin, jolloin sekunnin kymmenesosien heitto mittausvälissä ei aiheuta ongelmia.

Kun pH on mitattu se tallennetaan kahteen muuttujaan mikrokontrollerin välimuistiin. Ensimmäinen muuttujan avulla lasketaan keskiarvoa viimeisimmästä 10 mittauskerrasta. Tämän keskiarvon avulla arvioidaan pH:n muutoksen nopeutta. pH:n muutosnopeudesta riippuen säädelään emäspumpun päällä oloaikaa. Tällainen muuttuja on tarpeellinen, jotta ohjelma osaa anostella oikean määrän emäsluosta silloin kun kasvu, ja siten pH:n muutos, on nopeaa tai hidasta.

Toiseen muuttujaan tallentuu pH:n keskiarvo viimeisen 30 mittauskerran ajalta. Kun viimeinen mittaus on tehty vertaa ohjelma saatua keskiarvoa käyttäjän asettamaan lukuun. Mikäli pH:n keskiarvo on pienempi kuin asetettu arvo käynnistää ohjelma emäspumpun ensimmäisen muuttujan määräämäksi ajaksi. Tämän jälkeen saatu keskiarvo poistetaan muistista ja ohjelma aloittaa mittaukset alusta.

5.2 Lämpötilan mittaus ja ohjaus

Lämpötila-anturi DS18B20 kommunikoi mikrokontrollerin kanssa analogisen signaalin sijaan digitaalisesti käyttäen apunaan 1 Wire-kirjastoa. Digitaalisen anturin käytön etuina on mittauksen tarkkuus, johdinhäviöitä ei tarvitse ottaa huomioon ja se sallii useamman samanlaisen sensorin rinnankytkemisen samaan pinniin. Huonona puolena on hieman monimutkaisempi koodi.

Kun ohjelma on mitannut lämpötilan se ensin vähentää mitatusta arvosta käyttäjän kalibroiman offset-arvon, josta saatua arvo verrataan käyttäjän asettamaan tavoitearvoon. Mikäli mitattu lämpötila alittaa tavoitellun lämpötilan ohjelma käynnistää lämmittimen. Vaikka lämpötilan muutos tapahtuu reaktorissa hitaasti, noin $0,20 \text{ }^\circ\text{C} / 1 \text{ min}$, on koodissa huomioitu tilanne jossa lämpötila jää heilahtelemaan juuri tavoitelämpötilan kohdalle. Ohjelma estää tällaisen tilanteen antamalla lämpötilan laskea noin asteen tavoitelämpötilasta ennen lämmittimen päällekytkemistä.

5.3 Pinnankorkeuden mittaus ja ohjaus

Mikrokontrolleri vastaanottaa analogisen signaalin (0 V...5 V) kelluntakytkimiltä ja päättelee jännitteen tasosta pinnankorkeuden. Tämä pinnankorkeus lähetään sarjayhteyden kautta tietokoneen käyttöliittymään, josta käyttäjä helposti näkee pinnankorkeuden. Pinnankorkeutta säädellä ohjaamalla digitaalisten pinnien tilaa, jotka taas ohjaavat releiden toimintaa. Kun mikrokontrolleri huomaa että pinnankorkeus on laskenut liian alhaalle, eli alin kelluntakytkin menee pois päältä, laite kytkee päälle täyttöpumppua ohjaavan releen. Mikäli pinnankorkeus nousee liika, eli korkeimmalla oleva kelluntakytkin kytkeytyy päälle, käynnistyy tyhjennyspumppua ohjaava rele.

5.4 Datan tallennus

Yksi vaadittu ominaisuus laitteeseen oli mitatun datan tallennus, jotta reaktorin muutoksia pystyttäisiin arvioimaan ilman jatkuvaa, käsin tehtävää mittaustulosten kirjausta. Ensimmäinen ratkaisu oli rakentaa LabVIEW-käyttöliittymään oma osionsa jossa kerättyä dataa voisi tarkastella XY-graafin muodossa. Ongelmaksi kuitenkin muodostui itse labVIEW, sillä sen graafit on suunniteltu lähinnä reaaliaikaisen data esittämiseen. Toisena ongelmana olisi datan siirto käyttöliittymästä muihin ohjelmiin, kuten Exceliin.

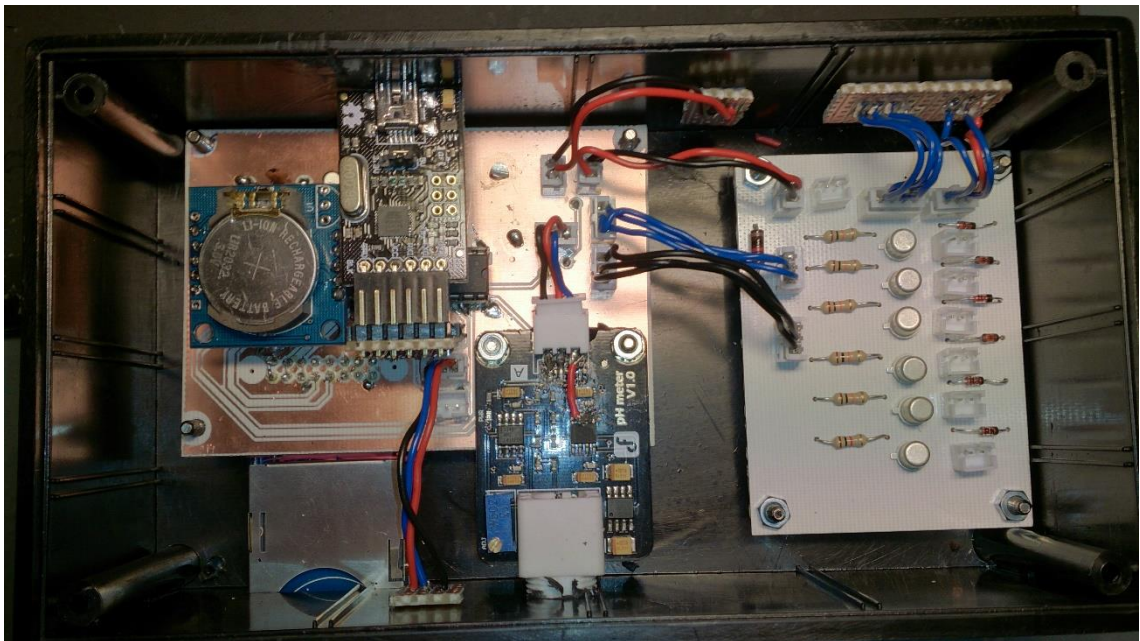
Lopulta datan tallennuksessa päädyttiin käyttämään SD-korttia ja siihen sopivaa korttimoduulia. Kortin toiminta on seuraava: ohjelma luo 'Excel.txt'-nimisen tiedoston kortille, johon tallentuu 60s välein kellonaika, lämpötilan ja pH:n keskiarvo viimeisen 30 mittauskerran ajalta, sekä se onko lämmitin tai emäspumppu käynyt päällä tänä aikana. Data tallentuu siis esimerkiksi muodossa: "12:30,27.20,6.5,0,1". Järjestys on siis seuraava: aika, lämpö, pH, lämmitin, emäspumppu. Lämmittimen ja emäspumpun päälläoloa ilmoistaan numeroilla 1 ja 0, missä 1 ilmaisee päälläoloa ja 0 ei-päälläoloa. Kun data on tallennettu tässä muodossa se on helppo lisätä Excel-taulukkoon ja tarkastella sitä kautta.

SD-kortin ei tarvitse olla kiinni laitteessa, jotta säätelyjärjestelmä toimisi, minkä ansiosta kortin voi poistaa milloin vain, mikäli jo kerättyä dataa halutaan heti tarkastella. Kortin ollessa irti data ei tietenkään tallennu mihinkään. Ohjelma tukee ainakin 2 GB ja 4 GB:n muistikortteja, mutta tätä suurempia kortteja ei ole laiteessa testattu, eikä SD-moduulin valmistaja tai SD-kirjaston kirjoittaja anna tästä tarkempaa tietoa. SD-moduuli kommunikoi mikrokontrollerin kanssa käyttäen mikrokontrollerin SPI-pinnejä.

6 TULOKSET JA POHDINNAT

Aluksi testausta tehtiin protolevyille ja koekytkentälevylle rakennetulla prototyypillä. Kun prototyyppi todettiin toimivaksi, rakennettiin siihen perustuva lopullinen laite. Fyysisesti prototyypin ja lopullisen laitteen erona ei ole muuta kuin se, että lopullinen työ tehtiin sitä varten suunnitellulle piirilevyille.

Lopullinen laite suunniteltiin siten että sen sisältämät osat pystytään tarvittaessa irrottamaan ja vaihtamaan. Tämä tehtiin siksi, että jatkokehitys onnistuu, jos tulevaisuudessa päädytäänkin käyttämään esimerkiksi erilaista ratkaisua releiden suhteen. Modulaarinen ratkaisu helpottaa myös viallisen osan vaihtamista. Lisäksi laitteen testauksen aikana modulaarisuus helpotti selvästi vian etsintää, kun laite ei ensimmäisillä testikerroilla alkanutkaan toimimaan.



Kuva 5. Kuva laitteen sisältä.

Laitteen tärkein tavoite oli pitää reaktorin lämpötila ja pH mahdollisimman lähellä asetettuja lukemia. SD-kortille tallennetuista arvoista pystyy päättämään miten tavoitteissa onnistuttiin. Opinnäytetyön tekemisen aikana testiajoja tehtiin useita, ja niiden välillä on tehty muutoksia ja parannuksia varsinkin pH:ta säätelävään koodiin. Liitteestä 1 löytyy kuvaajia, joissa on otettu parin tunnin näyte pH:n ja lämpötilan käyttäytymisestä eri testauskerroilla. Lisäksi liitteessä 1 on myös kuvaajia, joissa verrataan emäspumpun vaikutusta reaktorin pH:n.

Eri testauskertojen välillä mikrokontrollerin koodiin tehtiin muutoksia liittyen datan tallennukseen, pH:n säätöön ja siihen, miten kontrolleri kommunikoi tietokoneen kanssa. Lämmönsäätely todettiin toimivaksi ensimmäisellä testauskerralla, joten siihen ei tehty jälkepäin muutoksia. pH:n säätelyä muutettiin useita kertoja, ja viimeisellä mittauskerralla pH-saatiin pysymään hyvin lähellä asetettua arvoa, kuten ilmenee liitteen 1 viimeisestä kuvaajasta: ”Kolmas testiajo -emäspumpun vaikutus pH:hon.”

6.1 Kehityksen ongelmat ja ratkaisut

Laitetta kehitettäessä eteen tuli vastaan ongelmia sekä koodin ja laitteen suhteen, joiden ratkaisussa saattoi usein kulua viikkoja. Esimerkiksi yhtenä suurena ongelmana oli mikrokontrollerin välimuistin täytyminen. Prototyypin testattaessa huomattiin laitteen lakkaavan toimimasta noin 10 h:n päästä laitteen käynnistämisestä. Vikaa etsittiin kauan, koska laitteen koodi oli tässä vaiheessa jo noin 300 rivin mittainen. Lopulta ongelman syyksi todettiin välimuistin ylivuoto, joka luultavasti johtui pH:ta säätävästä koodista. Ongelma saatiin lopulta korjattua, mutta on mahdollista, että sama ongelma toistuu jatkokehityksessä koodin kasvaessa isommaksi.

Toinen iso ongelma kehityksessä syntyi kun laite ohjasi releitä silloin kun tietokone oli kytkettynä laitteeseen. Tästä nimittäin aiheutui joskus tietokoneen kaatuminen. Ongelma poistui erottamalla USB:stä tuleva 5 V:n käyttöjännite laitteen omasta 5 V:n käyttöjännitteestä. Ilmeisesti releiden aiheuttama jännitteen heilahtelu vaikutti tietokoneen virranjakeluun. Toinen sarjakommunikaatioon liittyvä ongelma oli LabVIEW'n ja mikrokontrollerin välinen kommunikoinnin katkeilu. Ongelma korjaantui lisäämällä lähetettävään dataan ns. handshake-bitit, jotka ilmoittavat ohjelmille kommunikoinnin aloituksesta ja lopetuksesta.

6.2 jatkokehitys

Tämän työn jälkeen vuorossa on kahden vastaavanlaisen laitteen rakentaminen, jotta testamista voidaan tehdä yhteensä kolmella testireaktorilla. Tämä nopeuttaa erilaisten olosuhteiden tutkimusta ja helpottaa eri kasvatuskertojen vertailua keskenään. Muut testireaktorit voidaan toteuttaa yksinkertaisesti kopioimalla tässä työssä tehty laite. Toinen vaihtoehto on rakentaa yksi laite, joka ohjaa kaikkia kolmea reaktoria. Tähän kuitenkin vaaditaan mikrokontrolleri jossa on enemmän digitaalisia I/O-pinnejä. Yhtenä vaihtoehtona on esimerkiksi Atmega2561, jossa näitä pinnejä on parhaimmillaan käytössä 54.

Releohjauksen voisi tulevaisuudessa toteuttaa hieman eri tapaan. Transistorien sijaan voisi releitä ohjata tarkoitusta varten suunnitellulla Darlington-piirillä, esim. ULN2003:lla. Myös mekaaniset releet voisi korvata halvemmilla puolijohdereleillä. Tällöin releille pitäisi kuitenkin suunnitella oma piirilevy, eikä rikkoutuneen releen vaihto ole yhtä helppoa.

Tulevaisuudessa testireaktoreissa aiotaan kokeilla myös ravinnepumpun käyttöä. Ravinnepumpun tarkoitus on lisätä reaktoriin ravinteita, mikäli ohjelma huomaa kasvun hidastuvan, tai jos käyttäjä ajastaa ravinteiden lisäyksen itse. Tuki ravinnepumpulle itseasiassa löytyy jo tähän opinnäytetyöhön tehdyssä versiossa mikrokontrollerin koodissa ja ylimääräisistä relepaikoista. Sitä ei kuitenkaan pysty vielä käyttämään käyttöliittymän kautta, eikä sitä testattu tässä opinnäytetyössä.

Testireaktoriensa jälkeen olisi tarkoitus aloittaa testaaminen isomassa, noin 1 m³ säiliössä. Tässä versiossa luultavasti korostuu sekoituksen tärkeys sekä lämpötilan ja pH:n vaihtelu eri puolilla säiliötä. Tarpeen voi tulla esimerkiksi useampi lämpötila- ja pH-anturi. Isompaan säiliöön tarvitaan myös isommat pumput kuin testireaktoreissa käytetyt laboratoriopumput.

Jatkossa olisi tarpeellista tutkia myös hapen vaikutusta kasvuun. Sen tutkimiseen reaktoriin pitäisi lisätä hapen määrää mittaava anturi sekä varmistaa, että nestettä sekoittava ilma ei vääristä kyseisen anturin antamia arvoja.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin laite, joka kykenee säätelemään biopolttoaineiden kasvatusta ja tutkimusta varten rakennettua kasvatusreaktoria. Rakennettu laite pystyy omatoimisesti säätelemään reaktorin elinolosuhteita pitkiäkin aikoja ilman käyttäjän valvontaa, pois lukien antureiden kalibrointi ja emäsluos-säiliön täyttäminen. Lisäksi laite kerää itsenäisesti tietoa SD-kortille reaktorin tapahtumista, kuten pH:n ja lämpötilan muutoksista. Näin kerätty tieto helpottaa leväkasvun tutkimusta huomattavasti verrattuna käsin tehtävään kirjaamiseen.

Laitteen mikrokontrolleri kerää tietoa siihen kiinnitetyistä lämpötila-, pH- ja pinnankorkeus-antureista. Kerättyyn dataan perustuen laite säätelee reaktorin elinolosuhteita, kuten pH:ta, releohjattujen pumppujen avulla. Mikrokontrollerina käytettiin Atmega328P-PU:ta, ja sen ohjelmointiin Arduino IDE-ohjelmistoa. Laitteen asetuksien säätöön sekä reaktorin reaaliaikaiseen seuraamiseen käytettiin PC:lle suunniteltua käyttöliittymää, joka toteutettiin LabVIEW-ohjelmiston avulla.

LÄHTEET

[1] Biofuel.org.uk. History of Biofuels. [www-dokumentti].

Saatavilla: <http://biofuel.org.uk/history-of-biofuels.html> (Luettu: 8.1.2015)

[2] Wikipedia. EN 14214. [www-dokumentti].

Saatavilla: http://en.wikipedia.org/wiki/EN_14214 (Luettu 12.12.2014)

[3] Chist Yusuf. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*. Vol. 25, No 3, pages 294—306.

[4] Wikipedia. Heterotroph. [www-dokumentti].

Saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/Heterotroph#Types> (Luettu 8.1.2015)

[5] School of Life Sciences. 2011. Waste molasses alone displaces glucose-based medium for microalgal fermentation towards cost-saving biodiesel production. *Bioresource Technology*. Vol. 102, No 11, 6487—6493.

[6] Ceron-Garcia. 2012. A process for biodiesel production involving the heterotrophic fermentation of *C.protothecoides* with glycerol as the carbon source. *Applied Energy*. Vol. 103, March 2013, 341—349.

[7] pH-meter.info. pH meter. [www-dokumentti].

Saatavilla: <http://www.ph-meter.info/pH-electrode-construction> (Luettu 12.12.2014)

[8] DFRobot. PH meter(SKU: SEN0161). [www-dokumentti].

Saatavilla: [http://dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter\(SKU:_SEN0161\)](http://dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter(SKU:_SEN0161)) (Luettu 5.12.2014)

[9] 1-wire. [www-dokumentti].

Saatavilla: <http://www.maximintegrated.com/en/products/comms/one-wire.html>
(Luettu: 12.12.2014)

[10] Arduino IDE. [www-dokumentti]

Saatavilla: <http://arduino.cc/en/main/software> (Luettu: 19.02.2015)

Testiajot

