

# Automaattinen pH-säädin Arduino-ohjelmistoympäristössä kemian opetukseen

Maikki Roiha

Kemian opettajankoulutusyksikkö, Kemian osasto,  
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Helsingin yliopisto

**Abstrakti:** Tässä artikkelissa esitellään Helsingin yliopiston Tutkiva ja eheyttävä kemian opetus -kurssilla kehitetty automaattinen pH-säädin kemian opetukseen. Artikkelissa kuvaillaan kehittämisprosessi, testitapaus sekä pH-säätimen ympärille kehitetty projektioppimista hyödyntävä oppimistehtävä kemian opetukseen. Teoreettisessa viitekehyksessä esitellään konteksti projektin ympärille, joka rakentuu työssä käytetyn analogisen pH-mittarin toiminnasta sekä autenttisista esimerkeistä happamuuden automaattisesta valvonnasta kemianteollisuudessa. Artikkelissa esitellyn pH-säätimen kokoaminen vaatii useamman oppiaineen tietoja ja taitoja, kuten koodaamista, virtapiirien ymmärrystä ja happamuuden teorian hallitsemista. Oppimistehtävästä voi muokata ryhmän tasolle sopivan kontekstia ja ohjeistusta muokkaamalla sekä itsenäisen työskentelyn tuen määrään vaikuttamalla. Kehitetyllä automaattisella pH-säätimellä on monipuolisia mahdollisuuksia kouluopetuksessa ja projektiin tilattuja komponentteja voi hyödyntää uudelleen erilaisissa sovelluksissa.

**Avainsanat:** kemian opetus, pH, mittausautomaatio, projektioppiminen, Arduino.

Ota yhteyttä: maikki.roiha@hotmail.com

## 1 Johdanto

Kemian ala on teknologiamyönteinen. Digitaaliset ja automaattiset prosessit nopeuttavat tutkimusta ja tuotantoa, vapauttavat asiantuntijoiden tietopääomaa muihin tehtäviin ja mahdollistavat nopean vasteen muuttuvissa olosuhteissa. Esimerkiksi automaattisia happamuutta mittaavia ja dataa tallentavia laitteita on kehitetty 1950-luvulta lähtien (Neilands & Cannon, 1955). Myös kemian opetuksessa on hedelmällistä oppia autenttisista kemian tutkimuksen ja tuotannon prosesseista manuaalisten mittausten lisäksi. Kemian opetuksessa mittausteknologian käyttö ja automaatioon tutustuminen ovat perusteltua kemianteollisuuden ja tutkimuksen autenttisiin prosesseihin tutustumisessa. Esimerkiksi lukion opetussuunnitelmien perusteissa 2019 (Opetushallitus, 2019) kemian opetuksen yleisissä tavoitteissa mainitaan opiskelijan osaavan arvioida kemiaan ”*liittyvien teknologioiden tarjoamia ratkaisuja sekä niiden merkitystä yksilön, ympäristön ja yhteiskunnan kannalta*” sekä “[opiskelija] *osaa käyttää monipuolisesti asianmukaisia ohjelmia mallintamisen,*



*laskennallisten ja graafisten ratkaisujen sekä tulosten ilmaisemisen välineenä”.*

Tässä artikkelissa kuvaillaan Arduino-ohjelmistoympäristöön toteutetun automaattisen pH-säätimen kehittämisprosessi ja konseptin ympärille ideoitu oppimistehtävä kemian opetukseen projektioppimisen periaatteita seuraten. Tavoitteena oli kehittää automaattinen liuoksen pH:ta kontrolloiva systeemi siten, että tavoiteltua pH-arvoa ja muutoksen sietorajoja voi itse muuttaa Arduino IDE -ohjelmointialustalla. Arduinon käyttöä perustelee sen monipuoliset käyttösovellukset ja mahdollisuus kehittää oppijoiden kriittistä ajattelua, ongelmanratkaisukykyä ja kasvattaa kiinnostusta ideoiden kehittämisprosessia kohtaan (Galadima, 2014). Projekti sisältää konkreettista laitteiston kokoamista sekä koodausta ja koodin testausta. Kehittämisvaiheessa artikkelissa kuvataan tekijän itsensä oppimisprosessia projektin aikana alkuperäisestä suunnitelmasta valmiiseen prototyyppiin. Projekti on toteutettu osana Helsingin yliopiston Tutkiva ja eheyttävä kemian opetus -kurssia kemian opettajankoulutusyksikössä.

Artikkelissa esitellään ensin teoreettinen viitekehys, jossa käsitellään happamuutta, analogisen pH-anturin toimintaa ja asetetaan ne autenttiseen kontekstiinsa esittelemällä automaattisen happamuuden valvonnan esimerkkejä kemianteollisuudesta. Luvussa kolme kuvaillaan pH-säätimen kehittämisprosessi tehtyine päätöksineen, systeemin kokoamisohjeet sekä testausvaihe. Neljännessä luvussa esitellään projektioppimiseen pohjautuva oppimisaktiviteetti tehdyille pH-säätimelle. Viimeisenä luvussa viisi on pohdinta toteutetun projektin onnistumisesta, soveltumisesta kemian opetukseen sekä jatkokehittämismahdollisuuksista.

## 2 Teoreettinen viitekehys

Teoreettisessa viitekehyksessä luvussa 2.1 käsitellään pH:n mittaamista pH-anturilla ja sen opetuskontekstia. Tämän jälkeen samassa luvussa esitellään lyhyesti kehittämisprosessissa käytetyn pH-anturin toimintaperiaate. Luvussa 2.2 asetetaan kehitettävä systeemi kontekstiinsa kemianteollisuuden esimerkkien kautta, joissa hyödynnetään automaattista happamuuden valvontaa.

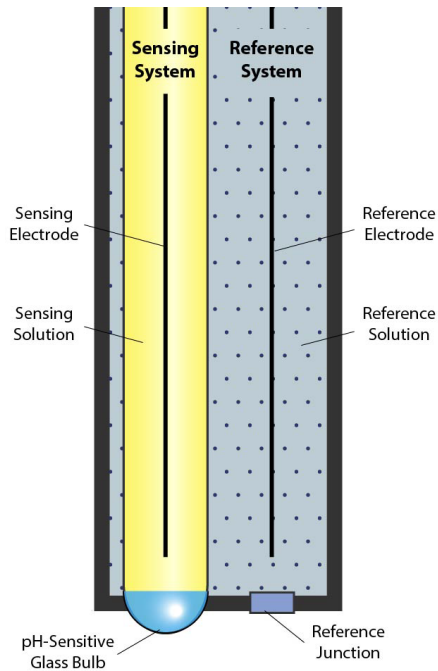
### 2.1 pH-arvon mittaaminen mittausautomaatiolla

pH-arvolla ilmaistaan liuoksen happamuutta sen sisältämien vetyionien määrän mukaan. pH-arvo lasketaan vetyionikonsentraatiosta sen negatiivisen kymmenkantaisen logaritmin avulla:

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+].$$

Kymmenkantaista logaritmia sisältävä kaava esitellään suomalaiskouluissa tavallisesti toisen asteen oppilaitoksissa. Tätä ennen happamuutta käsitellään yläaste-  
tasolla usein oksoniumionin konsentraation kautta, minkä päälle rakennetaan lisää  
tietoa lukiossa mm. happo- ja emäsvakioiden käsitteiden myötä. Happamuuteen liit-  
tyvää kokeellisuutta suoritetaan esimerkiksi indikaattoreilla, yleisindikaattoripape-  
rilla sekä mittausautomaatiolla, kuten tietokoneeseen kytketyillä pH-antureilla. Mit-  
tausautomaation käyttöä perustellaan myös lukion opetussuunnitelman perusteissa  
2019 (Opetushallitus, 2019), jossa kemian oppiaineen yhdeksi tehtäväksi määrätään  
mittaamisen taitojen kehittäminen erilaisten menetelmien kautta. Mittausautoma-  
tion käyttö opetuksessa kehittää mittaamisen taitoja sekä edistää keskustelun ja  
suunnittelun taitoja (esim. Aksela, 2011).

Artikkelissa kuvatussa kehittämisprosessissa käytetään pH-anturia, joka yhdiste-  
tään sen piirilevyn kautta Arduinon mikrokontrolleriin ja tietokoneeseen. Lasisen  
pH-anturin toiminta perustuu sähköpotentiaalieroon eli jännitteeseen mitattavan  
aineen ja vertailuaineen välillä (kuva 1). Anturin tuottama jännite on verrannollinen  
mitattavan aineen vetyionikonsentraatioon. Vertailuelektrodin ja mitattavan aineen  
välinen sähköpotentiaaliero muuttuu lasielektrodin pH-sensitiivisen lasin läpi vir-  
taavan liuoksen vetyionikonsentraation mukaan. Mikäli lasielektrodin sisällä olevan  
nesteeseen vetyionikonsentraatio on suurempi, kuin vetyionikonsentraatio sitä ympär-  
öivässä nesteessä, on mitattava liuos emäksinen. Mikäli konsentraatiot ovat samat,  
on mitattava liuos neutraali.



**Kuva 1.** Malli analogisesta pH-sensorista. Kuva: In-Situ, 2022. Noudettu 7.4.2024 osoitteesta <https://in-situ.com/us/faq/water-quality-information/how-do-ph-sensors-work>.

Vertailuelektrodin ja lasielektrodin välille syntyvä jännite muunnetaan analogiseksi lukemaksi Nernstin yhtälön avulla:

$$E_m = E_0 + \left( \frac{2,3RT}{nF} \right) \log[H^+].$$

Yhtälössä  $E_m$  kuvaa lasielektrodin potentiaalia,  $E_0$  vertailuelektrodin potentiaalia,  $R$  on kaasuvakio,  $F$  on Faradayn vakio,  $T$  on lämpötila kelvineinä ja  $n$  kuvaa ionivarausta. pH on suoraan verrannollinen Nernstin yhtälöön, josta saatu lukema näkyy joko mittarin omalla näytöllä tai näyttölaitteella, kuten tietokoneella.

## 2.2 Happamuuden automaattinen valvonta kemianteollisuudessa

Kemianteollisuudessa automaattista happamuuden valvontaa ja korjausta käytetään monissa eri sovelluksissa. pH:n säätäminen ja valvonta ovat tärkeitä työkaluja esimerkiksi veden liittyvissä prosesseissa, kuten jäteveden käsittelyssä (Zhang ym., 2020). Happamuutta on tarpeellista säätää myös ruoantuotannossa, jossa pH:n kontrollointi on tärkeää esimerkiksi kasvuolosuhteiden parantamiseksi (esim. Domingues ym., 2012). Happamuutta valvotaan myös esimerkiksi selluteollisuudessa, lääketeollisuudessa sekä yleisesti reaktio-olosuhteita säätäessä. Tässä projektissa käytetyllä Arduino-ympäristöllä voidaan mallintaa kemianteollisuuden sovellusten

happamuuden kontrollointia kouluopetuksessa.

### 3 Metodologia

Tässä luvussa esitellään projektin kehittämisprosessi alkuperäisestä ideasta testiver- sion kehittämiseen ja dokumentointiin.

#### 3.1 Kehittämisprosessi

Alkuperäisenä ideana oli luoda pH-anturin kontrolloima venttiili tietyn pH-arvoisen liuoksen valmistamiseksi. Idea muuttui melko nopeasti automaattisen pH-säätimen toteuttamiseen. Käytännössä haluttiin siis rakentaa systeemi, jossa on yksi liuos, jonka pH pyritään pitämään tiettyjen rajojen sisällä toisen happaman tai emäksisen liuoksen avulla. Systeemissä on jonkinlainen virtausta kontrolloiva laite, esimerkiksi pumppu tai venttiili, joka pumppaa hapanta ei emäksistä liuosta kontrolloitavaan liuokseen tarvittaessa pH-arvon ollessa sietorajojen ulkopuolella. Projektissa siis sekä mitataan systeemin olosuhteita (pH-anturi), että kontrolloidaan niitä (venttiili).

Taulukkoon 1 on koottu systeemin muuttujat, jotka systeemissä tulee ottaa huomioon. Muuttujia on tarkastelu niiden vaadittujen (sarake 2) ja tavoiteltavien (sarake 3) ominaisuuksien kautta, joiden perusteella tuotettiin morfologinen matriisi systeemin mahdollisista komponenteista (taulukko 2).

**Taulukko 1.** Systeemin muuttujien tarkastelu

Ominaisuus	Vaadittu	Tavoiteltava
Virtauksen säätely	Täytyy sietää laimeita happo- ja emäksisäyksiä. pH-asteikolla noin 4–10.	Hankitaan valmiiksi koottu kestävä ratkaisu, jota voi käyttää uudelleen toisissa projekteissa.
Putkien mitat	Täytyy sopia käytettävään virtauksen säätelijään.	Hankitaan virtauksen säätelijän kanssa.
Putkien materiaali	Täytyy sietää laimeita happo- ja emäksisäyksiä. pH-asteikolla noin 4–10..	Sisäleveys vähintään 2,5 mm?
pH:n mittaus	Täytyy kestää upotusta.	Käytetään jo valmiiksi hankittuja.
pH-arvon tarkistus	Liuoksen pH-arvo täytyy tarkistaa päätepisteessä.	Reaaliaikainen pH:n seuranta

Systemin valvonta		Videovälitteinen etävalvonta automaatiota lisäämässä (jos aikaa ja resursseja)
Datan keruu		Datan keruu pH-arvoista systemin oikean toimivuuden varmistamiseksi (jos ajallisia resursseja)
Virtalähde	Täytyy kattaa koko laitteiston tarpeet.	
Astiat happamille ja emäksisille liuksille	Täytyy sietää laimeita happo- ja emäslisäyksiä. pH-asteikolla noin 4–10. Tarpeeksi painavat, jotteivat systemin osat kaada astioita.	Käytetään valmiiksi hankittuja astioita.

Taulukosta 1 nähdään, että ”tavoiteltu”-sarakkeessa muuttujia on arvioitu niiden hankkimis- ja toteuttamishelpouden sekä systemin idealistisuuden kautta. Esimerkiksi muuttujalle ”monitoring the system”, eli systemin valvonta, on tavoitelluksi ominaisuudeksi kirjattu systemin videovälitteinen etävalvonta. Sen toteuttaminen tukisi systemin automatisointia ja toisi sitä näin lähemmäs autenttista kemianteollisuuden tutkimusta, mutta se on melko idealistinen lisäys systemiin etävalvonnan edellyttämän lisätyömäärän ja -komponenttien takia. Morfologisessa matriisissa (taulukko 2) päästiin teoriasta lähemmäs toteutusta etsimällä konkreettisia vaihtoehtoja systemin muuttujille. Esimerkiksi systemin venttiilin kontrolloimaan virtaukseen löydettiin kolme toteuttamiskelpoista vaihtoehtoa: peristalttinen pumppu, magneettiventtiili sekä käyttäjä itse manuaalisena kontrolloijana. Näistä viimeisessä tapauksessa käyttäjä itse lisäisi happoa tai emästä liukseen pH-mittarin antaman lukeman mukaisesti, mikä ei kuitenkaan palvelisi projektin tavoitteita automatisoidusta systemistä.

Morfologisen matriisin tarkoituksena oli löytää ja vertailla toteutettavissa olevia vaihtoehtoja komponenteille, jotka yhdistettiin toteuttamiskelpoisiksi konsepteiksi (taulukko 3).

Taulukko 2. Morfologinen matriisi systeemin mahdollisista komponenteista

pH-säädin		Ratkaisut			
		A	B	C	D
Toiminta	1 Virtauksen säätely	<b>Peristalttinen pumppu</b>	<b>Magneetti-venttiili</b>	Manuaalinen (käyttäjä säätelee)	
	2 Putkien mitat	2.5 mm	Isompi		
	3 Putkien materiaali	Silikoni	PVFD		
	4 pH:n mittaus	<b>Analoginen pH-anturi</b>	Indikaattori	Yleisindikaattoripaperi	
	5 pH-arvon tarkistus	<b>Tietokone (lukuarvot Arduinon sarjamonitorista)</b>	LCD-näyttö	LED-näyttö	pH-mittarilla oma näyttö
	6 Systeemin valvonta	Manuaalinen tarkkailu	Videovälitteinen etävalvonta		
	7 Datan keruu	Ei kerätä dataa	Ohjelmisto datan tallennukselle	Kerätään manuaalisesti Arduino IDE:n sarjamonitorista	
	8 Virtalähde	Seinäpistoke	Tietokone	Patteri?	
	9 Astiat happamille ja emäksisille liuoksille	250 ml keitinlasit	Pienemmät ja painavammat astiat		

Toteuttamiskelpoiset konseptit on valittu morfologisen matriisin muuttujien vaihtoehtoista. Konsepteiksi on valittu kaksi systeemiä peristalttisen pumpun ympärille ja kaksi magneettiventtiilin ympärille. Kummankinlaisessa systeemissä toinen konsepti on nimetty "idealistiseksi", millä tarkoitetaan systeemin vaativan enemmän taloudellisia tai vaivannäöllisiä resursseja toiseen samaa ratkaisua käyttävään konseptiin nähden. Käytännössä tämä tarkoittaa videovälitteisen etävalvonnan lisäämistä ja pH-datan talteen keräämistä ja käsittelyä Arduinosta erillisellä ohjelmalla. Kaikissa konsepteissa käytetään pH-anturia, koska se nähtiin automaation kannalta järkevimmäksi ratkaisuksi indikaattorin ja pH-paperin sijaan.

**Taulukko 3.** Toteuttamiskelpoiset konseptit

1B-2A-3A-4A-5A-6A-7C-8B-9A	Konsepti 1 "Venttiili"
1A-2A-3A-4A-5C-6B-7B-8A-9B	Konsepti 2 "Idealistinen pumppu"
1A-2A-3A-4A-5A-6A-7C-8A-9A	Konsepti 3 "Pumppu"
1B-2A-3A-4A-5A-6B-7B-8B-9A	Konsepti 4 "Idealistinen venttiili"

Seuraavaksi päätettyjä konsepteja arvioitiin niiden teknisen arvon (taulukko 4) ja taloudellisuuden (taulukko 5) mukaan. Teknisiin arvoihin lukeutuivat kestävyys, kokoamisen vaiva, tarkkuus (annosteltava hapon tai emäksen määrä), automaatio ja virrankulutus. Taloudellisesti konsepteja arvioitiin komponenttien hinnan, kunnossapidon ja muiden sovellusmahdollisuuksien mukaan. Kriteerit kummankin luokan sisällä arvoitettiin projektin tavoitteiden mukaisesti siten, että isomman painoarvon (sarake 2) saanut kriteeri nähtiin tärkeämpänä, kuin pienemmän painoarvon kriteerit. Esimerkiksi kriteeriä *kokoamisen helppous* pidettiin tärkeänä, koska kouluopetukseen tähtäävänä projektina kokoamisen tulee olla riittävän helppoa esimerkiksi yläkoululaisille. Tässä kategoriassa peristalttinen pumppu -konsepti on arvioitu paremmaksi kuin magneettiventtiiliset konseptit, sillä magneettiventtiilillinen systeemi tulisi rakentaa useampaan tasoon siten, että vesi pääsisi valumaan painovoiman avulla. Konseptien taloudellisella arvolla painotettiin materiaalikustannuksia sekä muita mahdollisia sovelluskohteita eri projekteihin. Ylläpitokustannuksissa magneettiventtiili arvioitiin peristalttista pumppua paremmaksi, sillä peristalttissa pumpussa on enemmän osia ja täten myös enemmän mahdollisesti vikautuvia ja kuluvia osia.

**Taulukko 4.** Konseptien tekninen arviointi painotetuilla kriteereillä

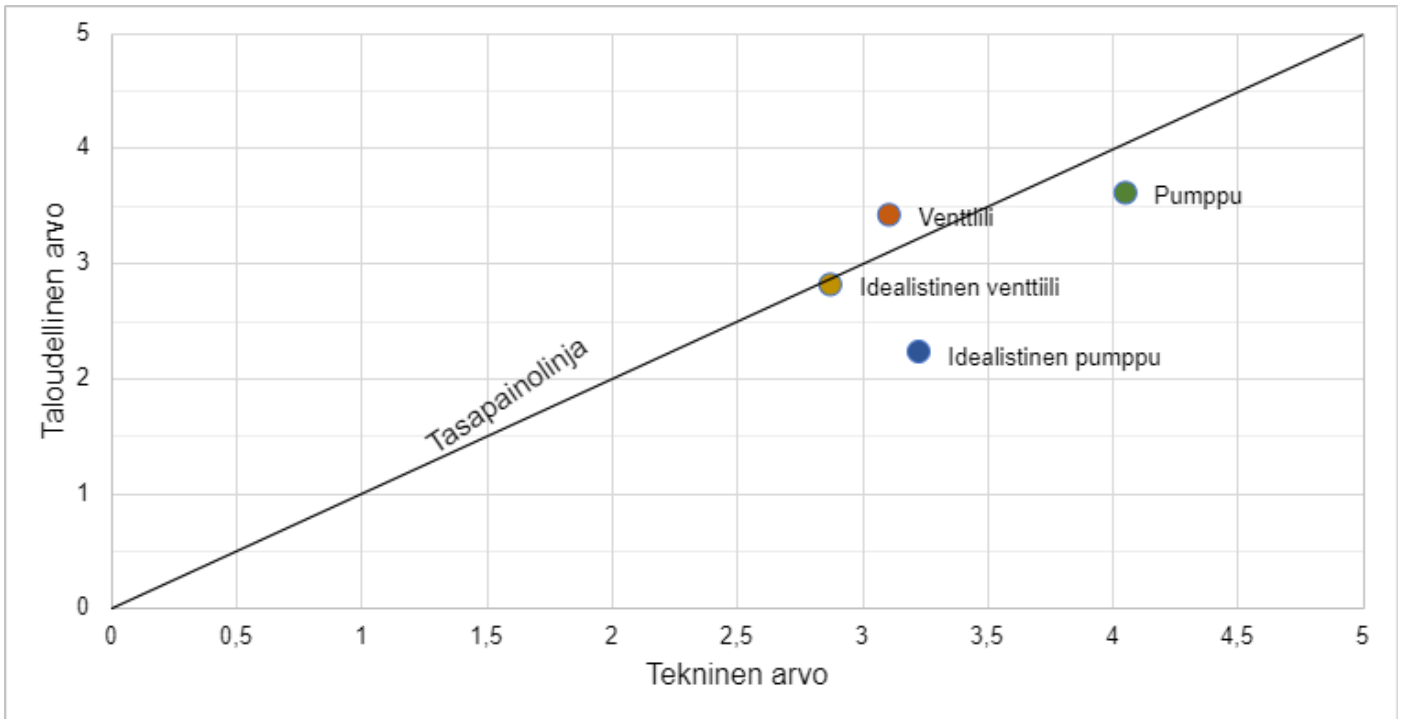
Kriteeri	Painoarvo	Venttiili	Idealistinen venttiili	Pumppu	Idealistinen pumppu
Kestävyys	3	4	4	3	3
Kokoamisen helppous	4	2	1	4	2
Tarkkuus	4	3	3	5	5
Automaatio	3	2	5	4	5
Virrankulutus	3	5	2	4	1
Summa	17	53	49	69	55
Summa (normalisoitu)	1	3,12	2,88	4,06	3,24
<b>Sijoitus</b>		<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>



**Taulukko 5.** Konseptien taloudellisuuden arviointi painotetuilla kriteereillä

Kriteeri	Painoarvo	Venttiili	Idealisti- nen vent- tiili	Pumppu	Idealisti- nen pumppu
Hinta	4	4	2	3	1
Ylläpitokustannukset	2	5	2	4	1
Sovelluskohteet	4	2	4	4	4
Summa	10	34	28	36	22
Summa (normalisoitu)	1	3,40	2,80	3,60	2,20
<b>Sijoitus</b>		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

Tämän jälkeen konsepteja vertailtiin keskenään niille asetettujen kriteerien perusteella. Kuvassa 2 on kuvattuna konseptien keskinäinen sijoittuminen niiden teknisen ja taloudellisen arvon perusteella. Tehdyn arvioinnin perusteella päädyttiin konseptiin 3, eli peristalttisen pumpun käyttöön ilman etämonitorointia tai datan keruuta. Konseptin 3 toteuttamisessa seurattiin Jeremy Bohrerin toteuttamaa ”Arduino pH Controller” -projektia (Bohrer, 2020) pienillä muutoksilla.



**Kuva 2.** Konseptien vertautuminen toisiinsa painotettujen kriteerien perusteella

### 3.2 Dokumentaatio

#### Materiaalikustannukset

Systeemi rakennettiin Arduino UNO R3 -mikrokontrollerin ympärille. Lisäksi käytettiin koekytKentälevyä sekä mikrokontrollerin ja koekytKentälevyjen pinneihin sopivia hyppylankoja (8 kpl). Systeemin sovelluskohteesta riippuen tarvitaan myös kaksi painavaa lasiastiaa (esimerkiksi 250 ml keitinlasit) ja hieman hapanta/emäkistä liuosta. Mikrokontrolleri yhdistetään tietokoneeseen ja koodaukset tehdään Arduino IDE -ohjelmointialustalla.

Kaikki komponentit tilattiin Farnellilta. Komponenttien hinnat on koottu taulukkoon 6 huhtikuussa 5.4.2024.

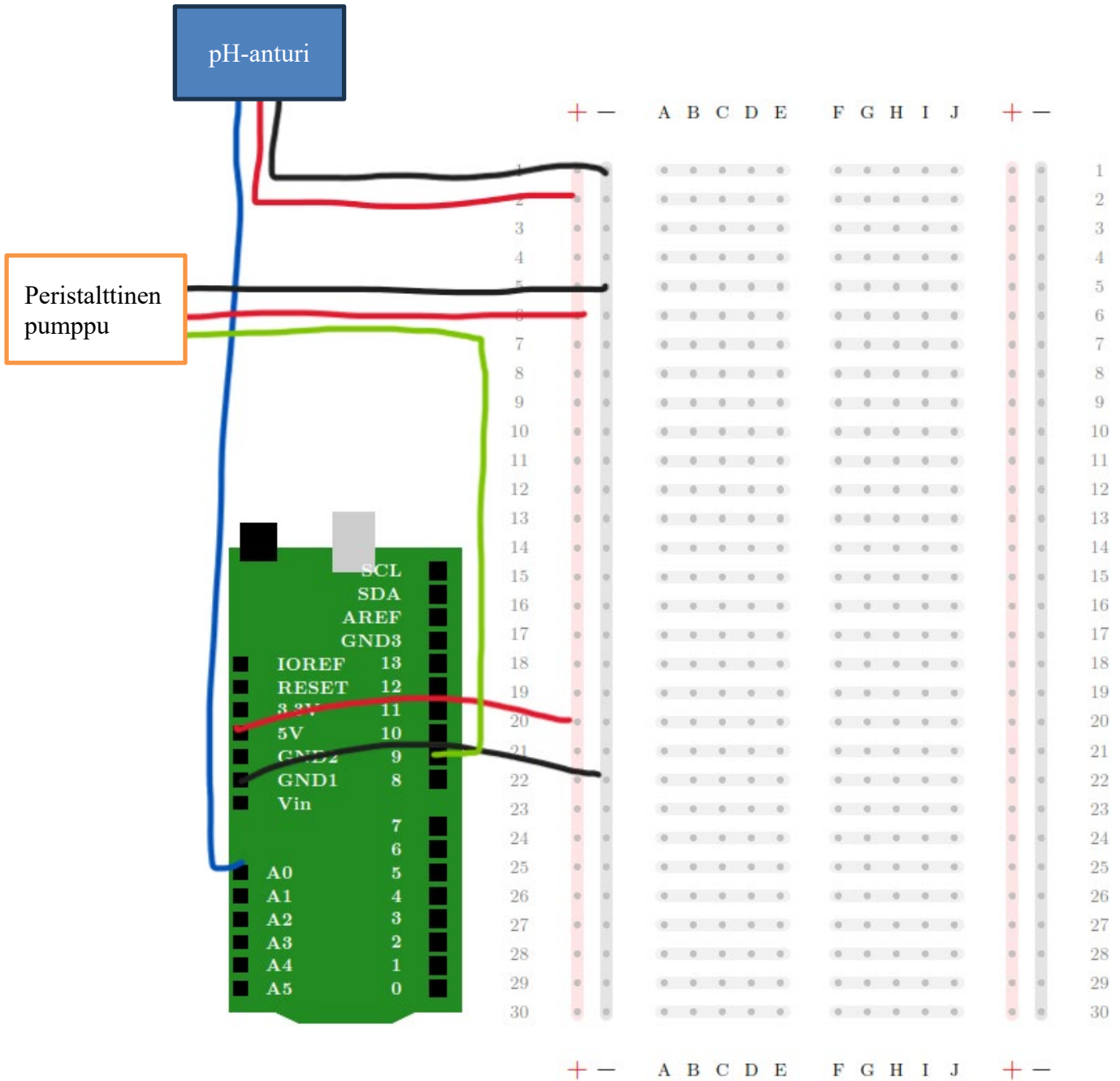
**Taulukko 6.** Komponenttien materiaalikustannukset

Komponentti	Komponentin tiedot, valmistaja	Komponentin hinta
pH-anturi	<u>DFROBOT</u> SEN0161	26,71 €
Peristalttinen pumppu	<u>DFROBOT</u> DFR0534	32,37 €
Virtalähde	<u>IDEAL POWER</u> 25hHK-AB-060A300-D56	33,94 €
Adapteri virtalähteelle	<u>VOLEX</u> 152522/3	4,66 €
Yhteensä		97,68 €

Komponenteista vain pumpun mukana tullutta silikoniputkea täytyi muokata: se tulee leikata kahtia saksilla, jotta pumppuun saa kaksi putkea.

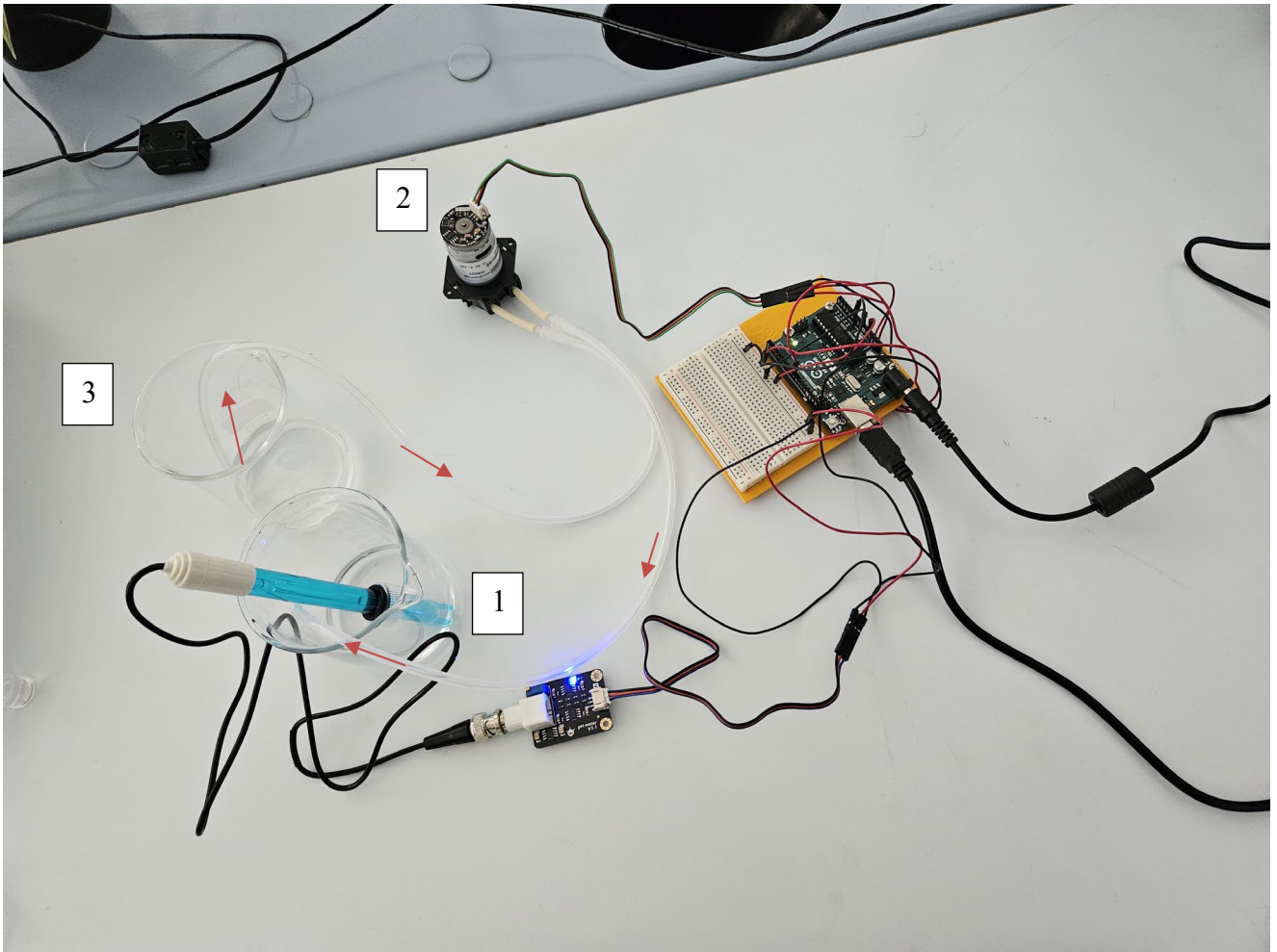
### Kokoamisohjeet

Peristalttinen pumppu ja pH-mittari yhdistetään Arduinon mikrokontrolleriin ja koekytentälevyyn kuvan 3 mukaisesti. Kuvassa vasemmalle ylös menevät kolme hyppylankaa (sininen, punainen ja musta) yhdistetään samassa järjestyksessä pH-mittarin piirilevyssä kiinni oleviin samanvärisiin pinneihin, joka kytketään itse pH-anturiin. Kuvassa oikealle menevät musta, punainen ja vihreä hyppylanka kytketään peristalttiseen pumppuun samassa järjestyksessä samanvärisiin pinneihin. pH-mittarin sinisen hyppylangan voi yhdistää muuhunkin vapaaseen analogiseen pinniin A0:n sijaan, kunhan sen muuttaa koodissa vastaamaan valittua pinniä. Sama pätee pumpun pinniin 9, jonka voi kytkeä myös muihin digitaalisiin pinneihin olettaen, että koodia muokataan sen mukaiseksi.



**Kuva 3.** Hyppylankojen kytkennät mikrokontrolleriin ja koekytkentälevyyn

Hyppylankojen kytkentöjen lisäksi mikrokontrolleri kytketään virtalähteeseen sekä tietokoneeseen. Kuvassa 4 näkyy koko systeemi, pois lukien mikrokontrolleriin mustilla johdoilla kytketty tietokone ja virtalähde. Kuvassa numero 1 kuvastaa pH-anturia ja sen piirilevyä, numero 2 peristalttista pumppua ja numero 3 emäksistä tai hapanta liuosta, jota pumppu pumppaa liuosta punaisten nuolten mukaisessa kulku-suunnassa.



**Kuva 4.** Koottu systeemi

## Turvallisuus

Yleisesti systeemiä kootessa ja testatessa tulee kiinnittää huomiota sähkön ja sähköä johtavan nesteiden työturvallisuuteen. Lasiastioiden tulee olla riittävän painavat, jotteivät ne kaadu silikoniletkujen tai pH-anturin painosta. Systeemiä kootessa tulee olla varovainen letkuja laittaessa ja erityisesti irrottaessa, jolloin ne voivat olla täynnä nestettä. Purkaminen ja kokoaminen tulisikin tehdä aina siten, ettei systeemi ole kytkettynä virtalähteeseen tai tietokoneeseen. Mikäli hapanta tai emäksistä liuosta sisältävässä keitinlasissa (kuvassa 4 numero 3) on ihoa ärsyttävää tai jopa syövyttävää liuosta, tulee letkuja käsitellä erityisellä varovaisuudella purkamisvaiheessa. Pumppu saattaa myös liikkua pöydällä päällä ollessaan, jolloin täytyy varmistaa, ettei se tipahda pöydältä tai vahingoita muita systeemin osia. Jatkokehityksenä pumpulle voisi rakentaa jonkinlaisen telineen, jossa se pääsisi toimimaan vapaasti, mutta pysyisi paikoillaan. pH-mittaria tulee säilyttää pystyasennossa.

Rakentamisessa tulee kiinnittää huomiota myös siihen, ettei itse systeemin osia (kuten hyppylankoja) pura tai paikkoja muokkaa mikrokontrollerin ollessa kytkettynä tietokoneeseen.

### 3.3 Prototyypin kehitys

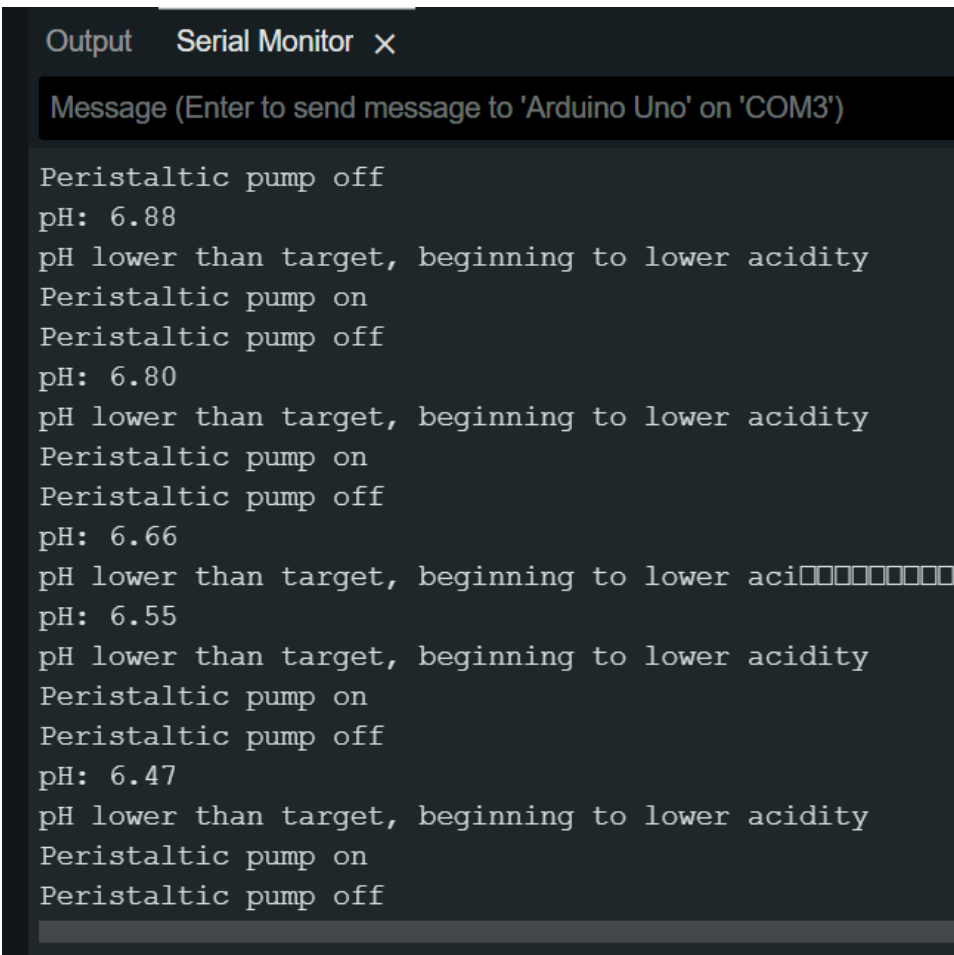
Prototyypin kehitys ja kokoaminen eivät eronneet aiemmissa luvuissa kuvatun konseptin 3 suunnitelmasta. Laitteisto koottiin samoilla periaatteilla ja esimerkkikoodi toimi sellaisenaan Arduino IDE -ympäristössä. Systeemiin lisättiin ulkoinen virtalähde, koska tietokoneesta saatavan jännitteen arveltiin olevan liian pieni pumpun tehokkaaseen toimintaan. Esimerkkikoodissa huomattiin yksi puute tulosteessa: tulosteessa sanottiin ”beginning to raise acidity”, kun tarkoitettiin oikeasti happamuuden laskemista. Tämä johtunee helposti sekaannusta aiheuttavasta pH:n *laskusta* happamuuden *nousteesta*. Alkuperäiseen koodiin muokattiin siis tuloste ”beginning to lower acidity”, kun mitattavan liuoksen pH-arvo laskee muutoksen viiterajan alapuolelle. Alkuperäiseen koodiin muokattiin myös testitapauksessa mitattavan liuoksen tavoiteltu pH-arvo ja sen viiterajat sekä pidennettiin hieman pH-anturin mittauksen ja pumppauksen syklin aikaväliä. Pidemmällä aikavälillä helpotettiin systeemin havainnointia ja koodin toimivuuden tarkkailua. Jatkokehitystä ajatellen tulosten koodin ohjeistuksen voisi vielä kääntää suomeksi. Systeemissä käytetty koodi löytyy liitteestä 1.

Päälle kytkiessä neste ei välttämättä heti lähde liikkumaan putkea pitkin, vaikka pumppu toimisi oikein. Tällöin putkien liitännät kannattaa tarkistaa ja kokeilla ”imevään” putkeen syntynyttä alipainetta esim. käsipaperilla. Systeemiin voisi kehittää putket täyttävän valmistelevan toiminnon, jolloin esimerkiksi nappia pohjassa pitämällä pumppu pumppaisi nestettä putkiin, kunnes ne täyttyvät.

### 3.4 Testausvaihe

Systeemiä testattiin luvussa 3.3 kuvatulla kokoonpanolla. Lasiastioina käytettiin kahta 250 ml keitinlasia. Molempiin dekantterilaseihin kaadettiin hanavettä liuoksiksi. Tämän lisäksi mitattavaan liuokseen lisättiin 0,1 molaarista suolahappoa (kuva 5), jotta testattiin systeemin toimimista ”autenttisessa” tilanteessa, jossa mitattavan liuoksen pH laski viiterajojen alapuolelle. pH-arvon tavoitteeksi asetettiin 7 (hanavesi oli käytetyn pH-anturin mukaan lähellä tätä), ja pH:n muutoksen sietorajaksi 0,05.

Systemi toimi, kuten oli odotettukin. Pumppu pumppasi hanavettä sisältävästä dekantterilasista vettä mitattavaan liuokseen, kun sinne lisättiin tipoittain suolahappoa (kuva 6). Hanavesi ei nosta liuoksen pH-arvoa kovin nopeasti, mutta testausvaiheessa riitti havainnoida systeemin toimivuus. Kuvassa 6 näkyy pätkä Arduino IDE -ympäristön sarjamonitorista suolahappolisäyksen jälkeen. Sarjamonitorista nähdään, kuinka systeemi reagoi kasvaneeseen happamuuteen pumppaamalla ”emäkistä” liuosta mitattavaan liuokseen. Systemi lukee uudestaan pH-arvon yhden pumpun pumppauksen jälkeen ja jatkaa lisäystä, jos pH ei saavuta sietorajojen sisäpuolisia viiterajoja. Kuvassa 5 pH-arvo näyttää laskevan vettä lisätessä, mikä voi johtua hapon huonosta sekoittumisesta mitattavaan liuokseen ja näin oksoniumionien epätasaisesta jakautumisesta happolisäyksen alussa. Rivillä 11 näkyvät neliöt olivat yksittäinen tulosteongelma, eivätkä esiinny koodissa kuvatun tilanteen jälkeen.



```

Output  Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3')
Peristaltic pump off
pH: 6.88
pH lower than target, beginning to lower acidity
Peristaltic pump on
Peristaltic pump off
pH: 6.80
pH lower than target, beginning to lower acidity
Peristaltic pump on
Peristaltic pump off
pH: 6.66
pH lower than target, beginning to lower aci□□□□□□□□□□
pH: 6.55
pH lower than target, beginning to lower acidity
Peristaltic pump on
Peristaltic pump off
pH: 6.47
pH lower than target, beginning to lower acidity
Peristaltic pump on
Peristaltic pump off

```

**Kuva 5.** Systemin koodi Arduino IDE -ympäristössä



**Kuva 6.** Testausvaiheen mitattavan liuoksen pH:ta laskettiin suolahapolla.

## 4. Projektioppimisesimerkki kehitetystä systeemistä

Tässä luvussa esitellään kehitetyn systeemin projektioppimiseen pohjautuva oppimistehtävä. Luvussa 4.1 esitellään lyhyesti projektioppimisen tunnuspiirteet, jonka jälkeen luvussa 4.2 on ohjeistus projektioppimista hyödyntävään oppimistehtävään.

### 4.1 Projektioppimisen piirteet

Projektioppiminen on oppijakeskeistä toimintaa, jota ohjaa oppijan autonomia, tutkimus, tavoitteiden asetus, yhteistyö ja kommunikaatio. Projektioppiminen liittyy reaali maailman kysymyksen oppimiseen. (Kokotsaki ym., 2016). Projektioppimisella on mahdollisuuksia parantaa motivaatiota ja asenteita oppiainetta kohtaan, saada syvempi ymmärrys oppiaineesta ja harjoittaa työelämä taitoja, kuten ongelmanratkaisukykyä ja kriittistä ajattelua (Larmer ym., 2015). Keskeisinä piirteinä projektioppimisella ovat lähtökohtana toimiva reaali maailman kysymys tai ongelma, projektin aktiivinen tekovaihe sekä työskentelystä syntyvä tuotos. Kokotsakin ja muiden (2016) mukaan onnistuneessa projektioppimisessä on kuusi elementtiä: 1) oppijat saavat opastusta ja tukea projektityöskentelyn aikana, 2) opettajille tulee tarjota



tukea projektioppimisen toteuttamiseen, 3) laadukas ryhmätyöskentely edistämässä ryhmäläisten yhtäläistä osallistumista, 4) riittävä ohjeistaminen ja työskentelytaitojen kerryttäminen ennen itsenäiseen työskentelyyn siirtymistä, 5) arviointi perustuu työskentelyn reflektointiin sekä itse- ja vertaisarviointiin ja 6) oppijoiden mahdollisuus vaikuttaa projektiinsa projektioppimisen eri vaiheissa. Projektioppimisen arvioinnissa pääpaino on projektin aktiivisessa tekovaiheessa projektin tuotoksen sijaan.

## 4.2 Oppimistehtävä

Oppimistehtävän tavoitteena on suunnitella ja esitellä malli konkreettisesta sovel-luskohteesta artikkelissa esitellylle automaattiselle pH-säätimelle. Halutessaan tehtävänantoa voi vielä tarkentaa esimerkiksi kestävyysteeman sisälle. Kemiassa sisäl-töjä happamuudesta, sen laskennallisesta käsittelystä ja eri konteksteista voi eriyttää opetusryhmän tason mukaan. Vaikka tehtävänanto on sidottu tiettyyn mittausauto-maation laitteistoon, voivat oppijat syventyä heitä kiinnostavaan kontekstiin sen ympärillä. Olisi tärkeää, että projektien aiheet lähtisivät ryhmistä itsestään jäsenten kiinnostuksen mukaisesti, sillä se tukee Kokotsakin ja muiden (2016) painottamaa oppijoiden vaikuttamismahdollisuutta. Opettaja voi kuitenkin tukea ryhmien ideoin-tiprosessia avustavilla kysymyksillä ja arkielämän esimerkkita-pauksilla: *Mitä väliä on pH:lla ruokalan juomavedessä? Millaisissa happamuusolosuhteissa lempikas-viksenne kasvaa parhaiten? Miten organismit ovat riippuvaisia happamuuden muutoksista? Miten akvaarion, ruoantuotantoon käytettävän maaperän tai ruo-anlaiton pH:ta voisi säädellä ja mihin se vaikuttaa?* Projektin aihetta valitessaan ryhmät suorittavat tiedonhakuja, esittävät lisäkysymyksiä ratkaisustaan, testaavat projektituotoksensa toimivuutta ja kehittävät sitä testauksen ja palautteen avulla. Lopuksi tuotos, kuten demonstraatio akvaarion happamuuden valvonnasta ja kor-jaussysteemistä, esitetään muulle luokalle ja jätetään mahdollisesti esille muillekin ryhmille tai huoltajille tutustuttavaksi. Loppuvaiheen reflektio on tärkeä osa projek-tioppimista, ja ulkoiselle ryhmälle esiintyminen voi motivoida oppijoita panosta-maan projekteihin ja harjoittaa heidän kommunikaatitaitojaan (Larmer ym., 2015).

Oppijat voivat ryhmiensä tason mukaan käyttää pH-säätimen rakentamisen oh-jeita ja koodeja joko sellaisinaan, tai oppijoiden tason mukaan muokattuina. Ohjeis-tuksessa on hyvä näyttää ainakin koodin tulosteiden, tavoitellun pH-arvon ja sen vii-terajojen muokkaaminen sekä mainita mittaus- ja pumppaus-syklin aikarajojen muuttamisesta ja kannustaa kokeilemaan erilaisia vaihtoehtoja. Tällä tavoin ensisil-mäyksellä isohkolta tekstitiedostolta näyttävä koodiin tarttumisen ei tunnu liian

haasteelliselta ryhmille. Projektin ohjeistuksessa kannattaa kemian sisältöjen lisäksi painottaa projektin arkielämäkontekstin sitomista autenttisiin sovelluskohteisiin kemianteollisuudessa ja automaatiossa sekä (tehtävänannon mukaan) kestävyyskontekstissa, jotta tuetaan projektioppimisen tavoitetta reaali maailman asioiden käsittelemisestä. Jos esimerkiksi yksi ryhmä laatii rairuohon kasteluvettä valvovan systeemin, tulee se liittää laajemmin yhteiskunnalliseen kontekstiinsa ruoantuotannon ja/tai hydroponisen viljelyn avulla (kts. esim. Domingues et al., 2012; Sihombing et al., 2018).

Opettajan tulee avustaa projektin hallinnallisessa puolessa esimerkiksi aikataulujen laatimisessa. Tässä voi olla hyödyllistä asettaa joitakin välipalautuspäivämääriä, jotta oppijat hahmottavat helpommin projektiin käytettävän ajan. Projekti edellyttää jonkin verran Arduinon ja virtapiirien peruseriänteiden ymmärtämistä sekä koodauksen alkeita, jolloin opettajan tukea saatetaan tarvita paljonkin kokemattomammilla ryhmillä. Jotta voidaan tukea Kokotsakin ja muiden (2016) aiemmin esitellyjä projektioppimisen tuen ja arvioinnin elementtejä 1 ja 5, tulee opettajan arvioida projektia koko työskentelyn aikana ja kiinnittää huomiota kannustavaan palautteeseen aktiivisena tekoaikana. Tähän opettaja voi kiinnittää huomiota esimerkiksi kannustamalla oppijoita näkemään virheet luonnollisena osana oppimisprosessia ja avustaa mahdollisten turhautumisen tunteiden käsittelyssä ja epävarmuuden sietämisessä.

Projektiryhmien ihanteellinen koko on kolmesta neljään oppijaa. Näin kaikilla ryhmän jäsenillä on tasapuolisesti tehtävää ja ryhmän toimintaa on helpompi hallita. Aikaa projektiin kannattaa asettaa ainakin kolme–neljä 75 minuutin oppituntia, jonka jälkeen on vielä aikaa projektien esittämiselle sekä itse- ja vertaisarvioinnille. Oppimistehtävään on mielekästä integroida opiskeltavan kemianteorian lisäksi muitakin oppiaineita, kuten biologiaa, fysiikkaa ja tietotekniikkaa. Näin voidaan tukea lukion opetussuunnitelman perusteiden laaja-alaisen osaamisen osa-alueita *monitieteinen ja luova osaaminen* (Opetushallitus, 2019). Teemoja voi sisällyttää myös kestävyyskasvatuksesta, tulevaisuusajattelusta tai terveystieteistä. Projektiin voi yhdistää esimerkiksi etävalvontaa tai muita antureita, kuten lämpötila-anturin. Tällöin opettajan tai ryhmän jäsenten on oltava jo melko osaava Arduinon ja koodauksen kanssa tai tehdä esimerkiksi yhteistyötä muiden oppiaineiden opettajien kanssa.

## 5. Pohdinta

Artikkelissa esitely automaattinen pH-säädin vastaa asetettuihin tavoitteisiinsa. Alustaksi valittu Arduino toimi projektissa hyvin ja sallii sille monipuolisia muokaus- ja jatkokehitysmahdollisuuksia. Teknisesti pH-säädin on suhteellisen yksinkertainen rakentaa ja koodata toimimaan haluamallaan tavalla esimerkkikoodia muuntelemalla. Projektilla vastataan tarpeeseen esitellä autenttista kemian tutkimusta opetuksessa, sillä projekti toimii esimerkkinä automatisoidusta prosessista kemianteollisuudessa ja tutkimuksessa. Projekti hyödyntää kemian arkielämän relevanssia sekä edellyttää tieteenalojen välistä perspektiiviä, yhteistyötä ja monivaiheista tuotoksen kehittämistä, mitkä ovat autenttisten oppimiskokemuksen piirteitä (Lombardi, 2007).

Reaalimaailman kontekstien käyttö tekee myös pH-säätimelle kehitellystä oppimistehtävästä soveltuvan projektioppimiseen. Oppimistehtävä tukee myös muita projektioppimisen piirteitä, kuten oppilaslähtöisyyttä, kommunikaatiota ja yhteistyötä (Kokotsaki ym., 2016). Kehitetyllä oppimistehtävällä ja valmiilla materiaaleilla tuodaan projektioppimista saavutettavammaksi kouluopetukseen. Projektioppimisen käyttö tiedekasvatuksessa on perusteltua, sillä projektioppimisen on todettu tukevan opintomenestystä ja sen käyttöä suositellaan eri kouluasteilla (Balemen & Keskinen, 2018).

Kehittämisprosessissa tehdyt päätökset olivat perusteltuja projektiin käytettävien ajallisten resurssien puitteissa. Materiaalikustannukset ovat melko suuret vain yhteen projektiin käytettäväksi. pH-anturit ja pumput ovat kuitenkin suhteellisen kestäviä, ja niillä on paljon muitakin mahdollisia sovelluskohteita kouluopetuksessa. Koska konseptin rakentamisessa seurattiin jo toteutettua projektia ja valmista koodia (Bohrer, 2020), eivät kehittäjän melko alkeelliset koodaustaidot hidastaneet kehittämisprosessia.

Jatkokehittämisen kannalta konseptista voisi kehittää kannettavan version "kenttäkäyttöön", joka ei ole riippuvainen ulkoisista virtalähteistä kannettavan tietokoneen lisäksi. Kehittämisvaiheessa huomattu peristalttisen pumpun liikkuminen pöydällä voitaisiin ratkaista kehittämällä sille jonkinlainen alusta tai pidike. Jotta voidaan painottaa mittausta ja datan tulkitsemista entisestään, konseptiin voisi liittää mittausdataa tallentavan ja pH-arvon muuttumista visualisoivan osan, kuten Famularo ja muut (2016) tekivät projektissaan. Saavutettavuutta lisätäkseen kooditiedostossa näkyvät ohjeet voisi muokata suomenkielisiksi. Jotkut oppijat saattavat

myös tarvita toisia enemmän tukea esimerkiksi projektin hienomotorisissa toimenpiteissä, kuten hyppylankojen asettamisessa koekytkentälevyn pinneihin.

## Lähteet

- Aksela, M. K. (2011). Engaging students for meaningful chemistry learning through Microcomputer-based Laboratory (MBL) inquiry. *Educació química*, (9), 30–37.
- Balemen, N., & Keskin, M. Ö. (2018). The Effectiveness of Project-Based Learning on Science Education: A Meta-Analysis Search. *International Online Journal of Education and Teaching*, 5(4), 849–865.
- Bohrer, J. (2020, November 4). Arduino pH Controller. *Medium*.  
<https://jjbskir.medium.com/arduino-ph-controller-dfcfb749c7fo>
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A. P., & Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 53–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
- Famularo, N., Kholod, Y., & Kosenkov, D. (2016). Integrating Chemistry Laboratory Instrumentation into the Industrial Internet: Building, Programming, and Experimenting with an Automatic Titrator. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 175–181.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00494>
- Galadima, A. A. (2014). Arduino as a learning tool. *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997577>
- In-Situ. (2022, June 7). How do pH sensors work? *In-Situ*. <https://in-situ.com/us/faq/water-quality-information/how-do-ph-sensors-work>
- Kokotsaki, D., Menzies, V., & Wiggins, A. (2016). Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools*, 19(3), 267–277. <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- Larmer, J., Mergendoller, J., & Boss, S. (2015). *Setting the Standard for Project-Based Learning: A Proven Approach to Rigorous Classroom Instruction*. ASCD (Association for Supervision and Curriculum Development)
- Lombardi, M. M. (2007). Authentic Learning for the 21st Century: An Overview. *EDUCAUSE Learning Initiative*, 1, 1-12.
- Neilands, J. B., & Cannon, M. D. (1955). Automatic Recording pH Instrumentation. *Analytical Chemistry*, 27(1), 29–33. <https://doi.org/10.1021/ac60097a010>
- Opetushallitus (2019). Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. PunaMusta Oy, Helsinki.  
[https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/lukion\\_opetussuunnitelman\\_perusteet\\_2019.pdf](https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2019.pdf)
- Sihombing, P., Karina, N. A., Tarigan, J. T., & Syarif, M. I. (2018). Automated hydroponics nutrition plants systems using arduino uno microcontroller based on android. *Journal of Physics: Conference Series*, 978, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/978/1/012014>
- Zhang, W., Tooker, N. B., & Mueller, A. V. (2020). Enabling wastewater treatment process automation: leveraging innovations in real-time sensing, data analysis, and online controls. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(11), 2973–2992.

## Liite 1. Koodi Arduino-ympäristössä

```

// setup peristaltic pump
#include <Servo.h>

Servo waterPump;

// digital ppm pin
const int WATER_PUMP_PIN = 9;
// analog input pin
const int PH_SENSOR_PIN = 0;
// dose solution for 2 seconds
const int doseDuration = 2000;
// wait 5 seconds before reading pH again
const int sensorReadInterval = 5000;

// Change to your desired pH
const float pHTarget = 7;
const float pHToleration = 0.05;
// Calibrate your pH sensor in 7.0 solution.
// The difference 7.0 and the pH read is your offset.
// More instructions can be found in the wiki
const float pHOffset = 0.00;
boolean isDosing = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  waterPump.attach(WATER_PUMP_PIN);
  Serial.println("Starting");
}

void loop() {
  mainLoop();
  // pHCalibration();
}

void mainLoop() {
  float ph = getPh();
  Serial.println("pH: " + String(ph));
  // Can also do reverse check ph > pHTarget + pHToleration
  if (ph < pHTarget) {
    if (ph < pHTarget - pHToleration) {
      // start to raise the pH
      Serial.println("pH lower than target, beginning to lower acidity");
      isDosing = true;
    }
    if (isDosing) {
      dose();
    }
  } else {

```

```

    isDosing = false;
}

delay(sensorReadInterval);
}

void phCalibration() {
    float ph = getPh();
    Serial.println("pH: " + String(ph));
    Serial.println("Change pH offset to: " + String(7.00 - ph - phOffset));
    delay(sensorReadInterval);
}

void dose() {
    waterPumpOn();
    delay(doseDuration);
    waterPumpOff();
}

void waterPumpOn() {
    // change to 0 if you want water to flow otherway
    // doesn't do much until it reaches 150.
    Serial.println("Peristaltic pump on");
    waterPump.write(180);
}

void waterPumpOff() {
    Serial.println("Peristaltic pump off");
    waterPump.write(90);
}

float getPh() {
    unsigned long int avgValue; //Store the average value of the sensor feedback
    int buf[10],temp;

    for(int i=0;i<10;i++) //Get 10 sample value from the sensor for smooth the value
    {
        buf[i]=analogRead(PH_SENSOR_PIN);
        delay(10);
    }
    for(int i=0;i<9;i++) //sort the analog from small to large
    {
        for(int j=i+1;j<10;j++)
        {
            if(buf[i]>buf[j])
            {
                temp=buf[i];
                buf[i]=buf[j];
                buf[j]=temp;
            }
        }
    }
}

```

```
    }  
  }  
  avgValue=0;  
  for(int i=2;i<8;i++) //take the average value of 6 center sample  
    avgValue+=buf[i];  
  float pHValue=(float)avgValue*5.0/1024/6; //convert the analog into millivolt  
  pHValue=3.5*pHValue+pHOffset; //convert the millivolt into pH value  
  return pHValue;  
}
```