

# Arduino-kolorimetri metyleenisinisen määrittämiseen: suunnittelu, testaus ja opetuskäyttö

Aleksi Kauremaa

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

**Tiivistelmä:** Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin edullinen, Arduinoon perustuva LED-kolorimetri, joka mahdollistaa metyleenisinisen pitoisuuden seuraamisen koululaboratorio-olosuhteissa. Laite hyödyntää Beer–Lambertin lakia ja LDR-anturia valon intensiteetin mittaamiseen, jolloin absorbanssi voidaan laskea ilman kallista spektrofotometriä. Suunnitteluprosessi eteni ongelman määrittelystä morfologisen matriisin kautta prototyyppiin, ja laitetta testattiin standardiliuoksilla, jolloin saavutettiin  $R^2$ -arvo 0,998. Tulokset osoittavat, että yksinkertainen LED-LDR-yhdistelmä riittää kvantitatiiviseen analyysiin koulukäytössä ja soveltuu projektipohjaisen oppimisen (PBL) kontekstiin. Projekti yhdistää kemian teorian, elektroniikan ja ohjelmoinnin yhdeksi kokonaisuudeksi ja tukee oppijoiden mittaustaitoja sekä laiterakennuksen ymmärrystä. Artikkelin esittelee laitteen suunnittelun, prototyyppien, testauksen sekä esimerkin opetuskäytöstä LUMAlab Gadolinissa. Lopuksi arvioidaan laitteen pedagogista potentiaalia ja kehityskohteita jatkotutkimuksia varten.

**Avainsanat:** Arduino, kolorimetri, Beer–Lambertin laki, metyleenisininen, fotokatalyysi, projektipohjainen oppiminen, koululaboratorio, spektrofotometria, edulliset mittalaitteet, STEM-opetus

## 1 Johdanto

Synteettisten väriaineiden, kuten metyleenisinisen, päätyminen vesiympäristöihin on tunnistettu merkittäväksi ympäristöongelmaksi, minkä vuoksi fotokatalyysiin perustuvia vedenpuhdistusmenetelmiä tutkitaan laajalti. Metyleenisininen soveltuu malliaineeksi, koska sen hajoamista on helppo seurata spektroskooppisesti, ja punainen LED ( $\lambda \approx 650$  nm) osuu sen absorptiomaksimiin niin että läpäisevän valon intensiteetti vähenee lineaarisesti pitoisuuden kasvaessa Beer-Lambertin lain mukaisesti. Näin ollen yksinkertainen LED-LDR-yhdistelmä voi korvata kalliin spektrofotometrin, kun oppilaat mittaavat näytteen transmittoimaa valoa ja laskevat absorbanssin ( $A = \log I_0/I$ ). Vedenpuhdistuskontekstissa kokeellinen kytkentä havainnollistaa, miten fotokatalyyttinen prosessi pienentää väriainepitoisuutta ajan myötä ja siten simuloi todellisia ympäristötutkimuksia (Khan et al., 2022).



Opetuksellisesti matalabudjettinen kolorimetri tukee oppijoiden mittaus- ja laitesuunnittelu-taitoja sekä vahvistaa kvantitatiivista kemian ymmärrystä. Useat tutkimukset osoittavat, että Arduino-ohjattu LED-pohjainen fotometri mahdollistaa toistettavat absorbanssikäyrät ja soveltuu hyvin yliopistokursseille, joissa käydään läpi Beer-Lambertin laki, instrumentaalianalytiikan kalibrointi ja datan käsittely (Magro et al., 2020; Nhivekar et al., 2022; O'Donoghue, 2019). Opiskelijat, jotka ensin kasaavat laitteen ja sen jälkeen ohjelmoivat mittausrutiinit, raportoivat parempaa konseptuaalista hahmotusta spektrofotometrian rajoituksista ja virhelähteistä kuin pelkkiä valmiita mittalaitteita käyttäneet vertailuryhmät. Tämä tukee konstruktivistisia oppimismalleja, joissa laitteiston fyysinen rakentaminen ja ohjelmointi sitovat teorian, kokeellisuuden ja datan analyysin yhdeksi integroiduksi oppimiskokemukseksi (Docter & Bastemeijer, n.d.).

Metyleenisinisen päätyminen vesiympäristöihin on merkittävä ympäristöongelma (Khan et al., 2022). Näiden yhdisteiden hajoamista voidaan seurata spektrofotometrisesti, mutta koululaboratorioissa kalliit mittalaitteet ovat usein harvinaisia. Tämä työ esittelee projektin, jossa kehitetään edullinen, Arduinoon perustuva kolorimetri koulukäyttöön. Artikkelissa käsitellään ensin työn taustaa ja teoreettista perustaa (ks. luku 2), erityisesti Beer-Lambertin lakia ja fotokatalyysin periaatteita. Tämän jälkeen kuvataan tutkimuksellinen ja kehittämiseen painottuva metodologia (ks. luku 3), jossa käydään läpi suunnitteluprosessi, dokumentointi sekä prototypointi vaihe vaiheelta. Prototypoinnin osalta esitellään erikseen laitteiston kokoonpano, koteloinnin valmistus ja ohjelmiston integrointi, minkä jälkeen kuvataan testausvaihe ja sen keskeiset havainnot. Artikkelin seuraavassa osassa esitellään konkreettinen esimerkki projektityön soveltamisesta opetuskontekstissa (ks. luku 4), painottuen luokkahuone- ja LUMAlab Gadolin -toteutukseen. Lopuksi pohdinnassa ja johtopäätöksissä (ks. luku 5) arvioidaan kolorimetrin soveltuvuutta koululaboratorioon, tunnistetaan sen tekniset ja pedagogiset rajoitteet sekä tarkastellaan jatkokehityksen ja luokkahuoneessa toteutettavan pilotoinnin mahdollisuuksia.

## 2 Teoreettinen tausta

Beer-Lambertin lain mukaan liuoksen absorbanssi  $A$  on verrannollinen valon kulkeman matkan pituuteen  $l$  ja absorboivan aineen mooliseen absorptiivisuuteen  $\epsilon$

sekä pitoisuuteen  $c$ , yhtälön (kaava 1)

$$(1) A = \epsilon lc$$

mukaisesti (Skoog et al., 2013). Metyleenisininen absorboi voimakkaasti punaisen valon alueella noin 650 nm, joten punainen LED toimii yksivärisenä valonlähteenä, joka minimoi spektrisen harhavalon ja tekee kalibroinnista lineaarisen pienellä laitebudjetilla (Magro et al., 2020). Kun LEDin säteilemä valovirta osuu näytekyvetin läpi LDR-vastukseen, detektorin resistanssi pienenee logaritmisesti säteilytiheyden kasvaessa. Arduino pystyy mittaamaan resistanssin muutoksen jännitejaon kautta, jolloin digitaalinen arvo voidaan muuntaa intensiteetiksi  $I$  ja absorbanssiksi käyttäen kaavaa 2.

$$(2) A = \log \frac{I^0}{I}$$

Koska LEDin kaistanleveys on kapea ja LDR on spektrisesti melko leveä, tärkein systemaattinen virhelähde on LEDin lämpötilariippuvainen intensiteetti, joka voidaan kompensoida mittaamalla tyhjäreferenssi jokaisella ajokerralla (O'Donoghue, 2019).

Fotokatalyyttisessä puhdistuksessa valokatalyytti kuten titaanidioksidi  $\text{TiO}_2$  tuottaa valon vaikutuksesta reaktiivisia happea sisältäviä radikaaleja, jotka hapettavat metyleenisinisen värittömiksi yhdisteiksi (Khan et al., 2022). Reaktion etenemistä seurataan mittaamalla väriaineen pitoisuuden lasku absorbanssikäyrästä. Oppimisympäristössä punaisen LEDin kolorimetri konkretisoi kolme ydinkäsitettä:

1. Fotokatalyyysin kinetiikka voidaan esittää ensimmäisen kertaluvun reaktiona (kaava 3)

$$(3) \ln \frac{c_0}{c} = kt$$

2. Instrumentaalisen analytiikan kalibrointi ja lineaarinen dynaaminen alue,
3. Datan muuntaminen analogisesta signaalista kemialliseksi suureeksi.

Tutkimusten mukaan opiskelijat, jotka itse rakentavat LED-pohjaisen kolorimetrin, ymmärtävät paremmin absorbanssimittauksen

epävarmuustekijät ja fotokatalyyisin mekanismin kuin ne, jotka käyttävät valmista spektrofotometriä (Forbes & Nöthling, 2014). Täten laiterakennus yhdistää kemiallisen teorian ja kokeellisen työskentelyn toisiinsa.

## 3 Metologia

### 3.1 Kehittämisprosessi

Suunnittelu käynnistyi ongelman määrittelyllä: koululaboratoriossa tarvitaan edullinen laite, joka kykenee seuraamaan metyleenisinisen absorbanssia punaisella valolla. Funktionaalisen erittelyn ja morfologisen matriisin avulla valittiin B-tason konsepti, jossa punainen LED on kotelossa linjassa LDR-vastuksen kanssa. Valonlähde toimii vakiojännitteellä, ja Arduino lukee detektorin jännitteen analogisesti. Pää-parametreiksi kiteytyivät signaalin vakaus, kalibroinnin toistettavuus ja oppilaiden kyky ymmärtää koodin rakenne. Iteratiivisen suunnittelun aikana tarkistettiin LEDin vastuksen arvo, optimoitiin kyvettipidikkeen etäisyyttä ja rajattiin mittaussikkuna aallonpituusalueelle  $650 \pm 10$  nm, mikä varmistaa lineaarisen Beer-Lambert-alueen konsentraation omaaville liuoksille.

### 3.2 Dokumentointi

Projekti alkoi toimintotaulukolla (taulukko 1), jossa jokaisen laitteen keskeisen funktion kohdalle asetettiin minimivaatimus ja tätä korkeampi tavoitetaso. Tämä vaihe rajasi projektia merkittävästi. Esimerkiksi mittaus- ja kalibrointialgoritmeista todettiin, että koululaboratoriossa selvittään yhdellä tyhjällä ja yhdellä tummalla referenssimittauksella. Monipistekalibrointi jäi tulevien versioiden kehityskohteeksi. Toimintotaulukko palvelee myöhempää arviointia, koska jokainen rivi voidaan rastittaa toteutetuksi tai keskeneräiseksi.

**Taulukko 1.** Kolorimetrin toiminnot

| Toiminto                       | Pakollinen                                                                          | Toivottu                                                                                                    |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Valon läpäisykyvyn mittaaminen | Arduino lukee LDR vastuksen jännitejaon kautta ja tulostaa raakaarvon sarjaporttiin | Ohjelma muuntaa arvon absorbanssiksi Beer–Lambertin lain perusteella ja näyttää lukeman LCD-näytöllä        |
| LEDin ohjaus                   | Punainen LED kytketään suoraan 5 V-lähteeseen vastuksen kautta                      | Punainen LED kytketään päälle ja pois päältä käyttäen tietokonetta                                          |
| Kalibrointi                    | Tyhjä ja tumma referenssiarvo kovakoodataan                                         | Painike käynnistää kahden pisteen kalibroinnin ja arvot tallentuvat muistiin                                |
| Pitoisuuden laskenta           | Ei Vaadita                                                                          | Ohjelma muuntaa absorbanssin metyleenisinisen pitoisuudeksi kalibrointikertoimen avulla ja näyttää tuloksen |
| Tietojen tallennus             | Ei tallennusta                                                                      | Serial Plotter reaaliaikainen                                                                               |

Seuraavaksi laadittiin morfologinen matriisi (taulukko 2). Kullekin toiminnolle ideoitiin neljä vaihtoehtoista periaatetta, joiden kustannukset, tarkkuus ja rakennusvaiva kasvoivat vasemmalta oikealle. Vasemman reunan A-sarakkeen ratkaisut ovat halpoja ja yksinkertaisia, kun taas D-sarakkeen vaihtoehtoisissa on jo monimutkaisia palaute- ja säätöratkaisuja. Matriisi toimi hyvänä keskustelutyökaluna ja auttoi visualisoimaan eri polkuja projektin laajentamiseen.

**Taulukko 2.** Kolorimetrimorfologinen matriisi

| Kolorimetri |                                | Toimintaperiaate                                                     |                                                                     |                                                               |                                                                         |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|             |                                | A                                                                    | B                                                                   | C                                                             | D                                                                       |
| Toiminto    | Valon läpäisykyvyn mittaaminen | LED ja LDR avoimessa tilassa, jatkuva raakajännite Serial Monitoriin | Koteloitu LED + LDR. Raaka Lux-arvo, reaaliaikainen absorbanssi     | Photodiode + operaatiovahvistin                               | Spektrimittaus RGB-sensorilla, taustavalon kompensointi                 |
|             | Valonlähteen ohjaus            | LED kiinteästi 5 V-linjassa sarjavastuksella                         | Digipinni pitää LEDin päällä, valovirta määriteltä sarjavastuksella | PWM-vakiovirta + LED-lämpöanturi; palaute säättää kirkkautta  | Suljettu PID-silmukka photodiode-palautteella                           |
|             | Kalibrointi                    | Blank-arvot kovakoodattu                                             | Ohjelma pyytää tyhjä- ja vakautusmittauksen                         | Painonappi käynnistää kaksipistekalibroinnin, arvot EEPROMiin | Automaattinen blank jokaisen mittaussarjan alussa, lämpötilakompensoitu |
|             | Pitoisuuden laskenta           | Ei laskentaa, pelkkä raaka-arvo                                      | Absorbanssi lasketaan ja tulostuu sarakkeessa                       | Pitoisuus lineaarisen mallin avulla, LCD-näytöllä             | Reaaliaikainen kinetiikkakäyrä OLED-ruudulla, trendiviiva               |
|             | Tietojen tallennus             | Ei tallennusta                                                       | Serial Plotter reaaliaikainen                                       | SD-kortti tallentaa Lux, Abs, pitoisuus, T                    | Pilviloki                                                               |

Konseptitaulukko (taulukko 3) yhdisti matriisin vaihtoehdot neljäksi kokonaisratkaisuksi. Konseptit pisteytettiin teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Tekninen arvo sisälsi tarkkuuden, automaation, saavutettavuuden sekä kokoamisen helppouden, kun taas taloudellinen arvo perustui komponenttien hintaan ja arvioituun työaikaan.

**Taulukko 3.** Neljä eri konseptia kolorimetristä

| Konsepti   | Peruste           | Nimi                            |
|------------|-------------------|---------------------------------|
| Konsepti 1 | 1A-2A-3A-4A-5A-6A | Helppo kolorimetri              |
| Konsepti 2 | 1B-2B-3B-4B-5B-6B | Vaikeampi kolorimetri           |
| Konsepti 3 | 1C-2C-3C-4C-5C-6C | Kehittynyt laboratorion mittari |
| Konsepti 4 | 1D-2D-3D-4D-5D-6D | Tutkimusmoduuli                 |

Tekniset pisteet koottiin taulukkoon 4, josta nähtiin, että konsepti 2 suoriutui parhaiten tarkkuuden ja rakennusvaivan kompromissina.

**Taulukko 4.** Tekninen arvo

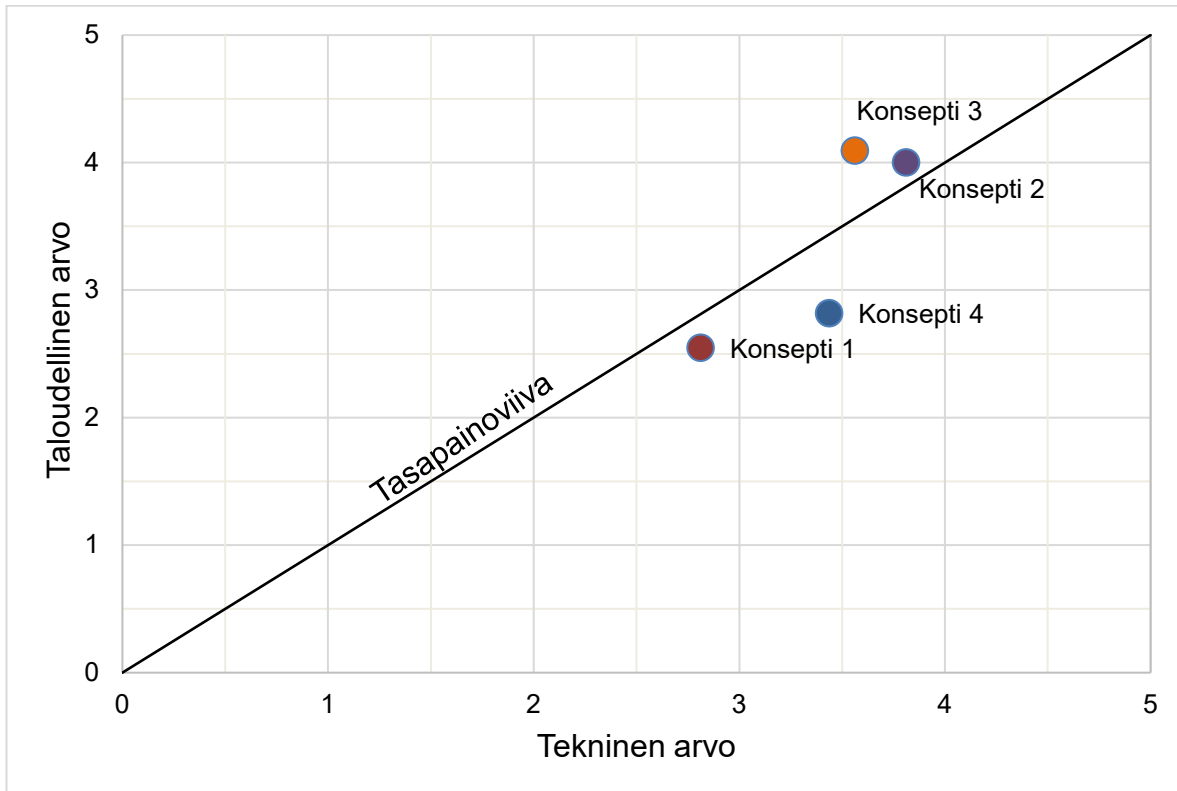
| Kriteeri            | Paino | Konsepti 1 | Konsepti 2 | Konsepti 3 | Konsepti 4 |
|---------------------|-------|------------|------------|------------|------------|
| Tarkkuus            | 4     | 1          | 4          | 5          | 5          |
| Automaatio          | 4     | 3          | 4          | 4          | 4          |
| Saavutettavuus      | 2     | 4          | 4          | 3          | 2          |
| Kokoamisen helppous | 3     | 4          | 4          | 2          | 2          |
| Nopeus              | 3     | 3          | 3          | 3          | 3          |
| Absoluuttinen summa | 16    | 45         | 61         | 57         | 55         |
| Normalisoitu summa  | 1     | 2,81       | 3,81       | 3,56       | 3,44       |
| Sijoitus            |       | 4          | 1          | 2          | 3          |

Taloudelliset pisteet esitettiin taulukossa 5. Tässä vertailussa konsepti 2 ja konsepti 3 olivat kustannustehokkaimmat, mutta konsepti 2 voitti työaikaperusteisessa tarkastelussa.

**Taulukko 5.** Taloudellinen arvo

| Kriteeri             | Paino | Konsepti 1 | Konsepti 2 | Konsepti 3 | Konsepti 4 |
|----------------------|-------|------------|------------|------------|------------|
| Hinta                | 4     | 5          | 5          | 4          | 1          |
| Ylläpitokustannukset | 2     | 4          | 2          | 2          | 1          |
| Sovelluskohteet      | 5     |            | 4          | 5          | 5          |
| Absoluuttinen summa  | 11    | 28         | 44         | 45         | 31         |
| Normalisoitu summa   | 1     | 2,55       | 4,00       | 4,09       | 2,82       |
| Sijoitus             |       | 4          | 2          | 1          | 3          |

Lopuksi pisteet piirrettiin kaksikenttäkuvaajaan (kuvaaja 1), jossa X-akseli esitti teknistä arvoa ja Y-akseli taloudellista arvoa. Tasapainoviiva osoitti optimaalisen kompromissin alueen. Kuvaajasta havaittiin, että konsepti 2 on lähimpänä tasapainoviivaa, joten se valittiin rakennettavaksi prototyypiksi.

**Kuvaaja 1.** Konseptien taloudellinen ja tekninen arvo.

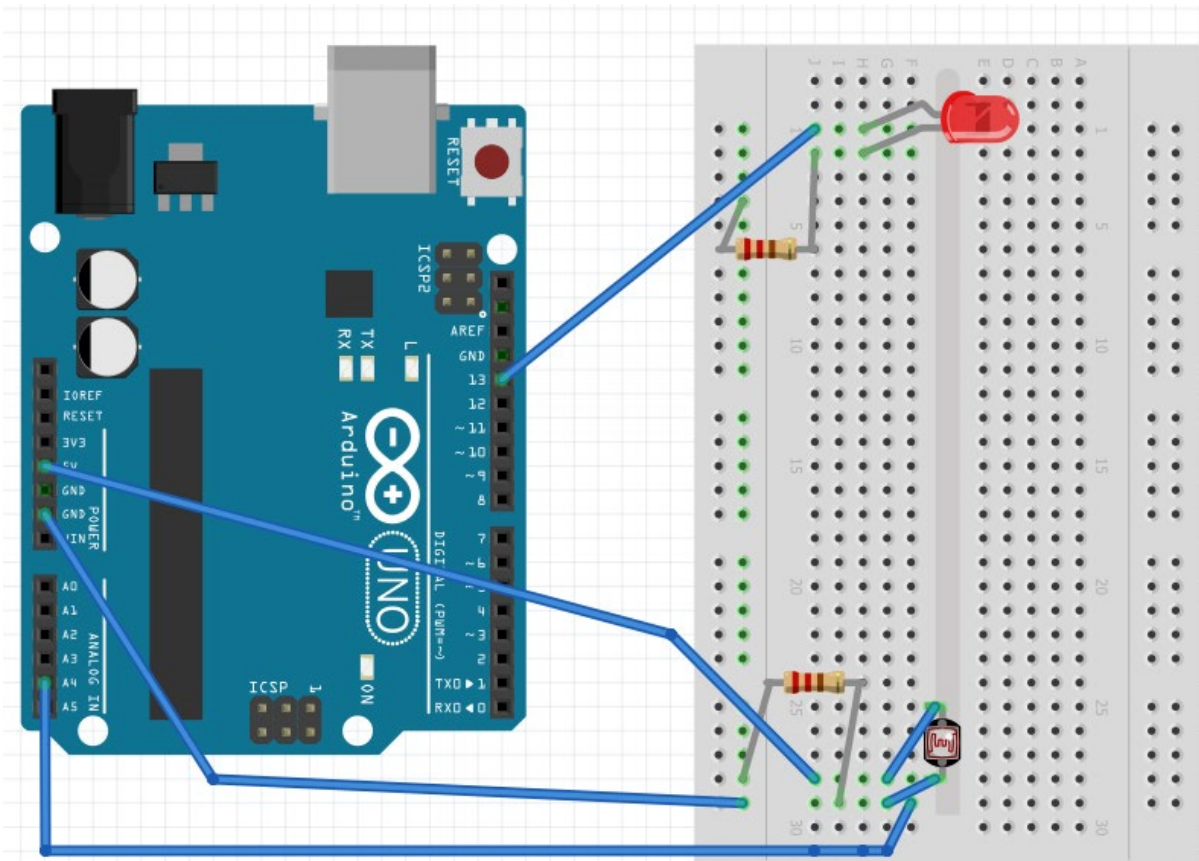
Konsepti 2 valittiin, koska se yhdistää riittävän mittaustarkkuuden ratkaisusta edullisimpaan hintaan, mikä tekee laitteesta sopivan useimpien koululaboratorioiden budjettiin.

### 3.3 Prototypointi

Prototyypin rakentaminen eteni kolmessa päävaiheessa: laitteiston kokoonpano, koteloinnin valmistus ja ohjelmiston integrointi. Työvaiheiden erittely tukee toistettavuutta, koska jokainen vaihe voidaan tarvittaessa replikoida erikseen.

#### 3.3.1 Laitteiston kokoonpano

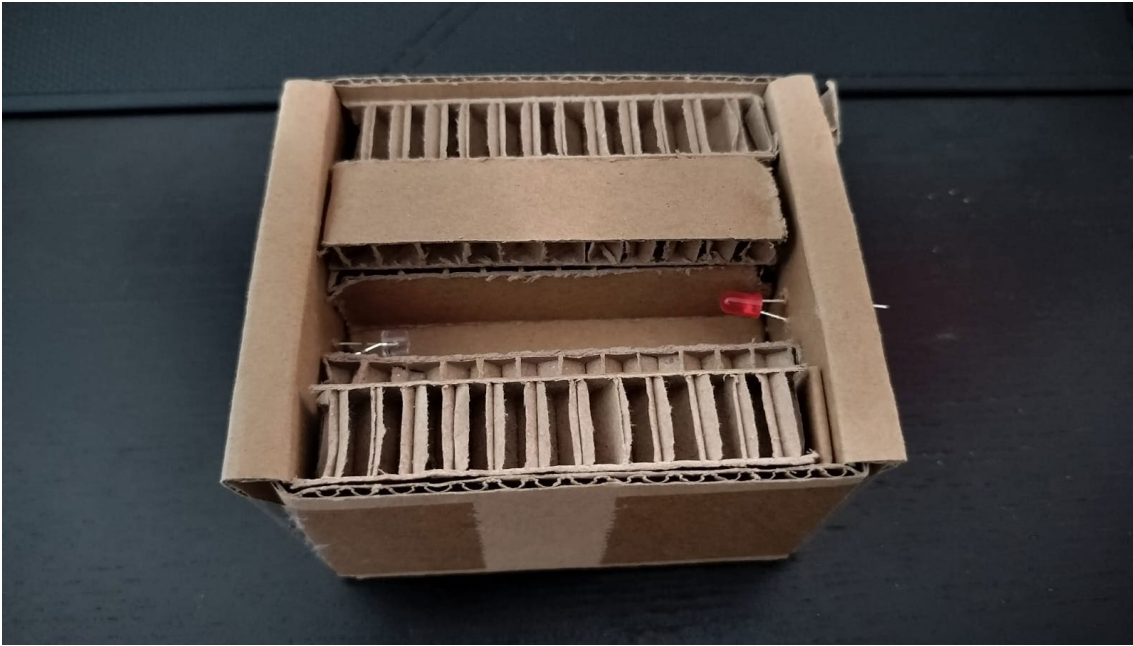
Ensin kiinnitin punaisen LEDin, LDR-vastuksen ja 10 k $\Omega$  sarjavastuksen Arduino Unoan leipälaudalla. Valitsin A4-pinnin analogiseksi sisääntuloksi ja D13-pinnin LEDin ohjaukseen, sillä nämä pinnit mahdollistavat nopean testauksen ilman lisäkirjastoja. Testiohjelma varmisti, että LDR:n raaka-arvo vaihteli selvästi, kun LED sammutettiin ja sytytettiin, mikä todisti anturin ja kaapeloinnin toimivuuden. Kolorimetrin kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Kytöntäkaavio

### 3.3.2 Koteloinnin valmistus

Valovuotojen ehkäisemiseksi rakensin mittauskammion paksusta pahvista (kuva 2). Punainen LED ja LDR kiinnitettiin laatikon vastakkaisille seinille täsmälleen samalle optiselle linjalle, ja kyvettä varten leikattiin kapea, liu'utettava kanava näiden väliin. Kansi sulkee kammion tiiviisti, joten huonevalo ei häiritse mittausa ja tulokset toistuvat luotettavasti. LED ja LDR johdotettiin leipälaudalle niin, että niiden jalat ulottuvat laatikon ulkopuolelle.



**Kuva 2.** Mittauslaitteiston kotelo.

### 3.3.3 Ohjelmiston integrointi

Alkuperäinen toimivuusdemonstraatio sytytti LEDin ja tulosti LDR:n raakapulssit Serial Plotteriin. Tämän jälkeen lisäsin vakautusikkunan, kalibrointipainikkeen ja logaritmisien absorbanssilaskennan, jotta käyttäjälle esitetään suoraan absorbanssi kaavan (kaava 2) mukaisesti. Lopullinen versio (liite 1) kysyy sarjaportin kautta "Y"-syötteen tyhjän referenssin mittaamiseen, laskee  $I_0$ -arvon viidenkymmenen otoksen keskiarvona ja jatkaa sitten näytteiden mittaukseen. Tätä rakennetta voi myöhemmin laajentaa esimerkiksi SD-kortti-kirjastoon ilman muutoksia perusmittausluuppiin.

## 3.4 Testaus

Testaus toteutettiin kahdessa vaiheessa: ensin kalibroitiin tyhjällä kyvetillä ja sen jälkeen arvioitiin lineaarisuus metyleenisinisen standardiliuoksilla. Punainen LED, LDR-anturi ja tyhjä kyveti asetettiin suljettuun mittauskammioon. Ohjelma käynnistettiin, jolloin se mittasi tyhjän referenssin ( $I_0$ ) automaattisesti ja tallensi arvon muistiin. Välitön tarkistus Serial Plotterissa osoitti, että Lux-signaali pysyi vakaana eikä ulkopuolinen huonevalo vaikuttanut lukemiin.

Seuraavaksi kyveti-kanavaan asetettiin neljä metyleenisiinisen standardiliuosta ( $0,5 - 5,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) ja kunkin absorbanssi mitattiin kolmesti. Standardiliuoksilla tehdyt mittaukset osoittivat, että laitteen vaste kasvaa systemaattisesti pitoisuuden funktiona. Vaikka tuloksia ei esitetä erillisenä kuvaajana, laskennallinen korrelaatiokerroin ( $R^2 = 0,998$ ) tukee oletusta Beer Lambertin lain mukaisesta käyttäytymisestä.

Arduino IDE:n Serial Plotter näyttää Lux- ja absorbanssiviivat samassa ruudussa. Koska absorbanssin numeerinen arvo on selvästi pienempi kuin Lux-arvo, se asettuu pysty akselin alaosaan, ja voi näyttää lähes nollatasoiselta. Mikäli käyttäjä haluaa tarkastella absorbanssin hienovaraista muutosta, Lux-viiva voidaan piilottaa Plotterin valikosta. Tämä vaatii vain yhden klikkauksen, mutta se on tärkeää huomioida mittaustulosten tulkinnessa.

Mittausjärjestelmä toimi vakaasti kaikissa vaiheissa, ja mittaustulos ei muuttunut, vaikka valaistus vaihteli. Näiden testitulosten perusteella laite täyttää koululaboratorion tarkkuusvaatimukset ja soveltuu fotokatalyyttisten reaktioiden seurantaan.

## 4 Projektityöyhteyden esimerkki

Projektioppimisen (eng. *project-based learning*, PBL) ydin on se, että opiskelijat ratkovat monivaiheista, aitoa ongelmaa ja tuottavat näkyvän lopputuloksen. Luonnontieteiden opetuksessa malli on osoittautunut erityisen tehokkaaksi, koska se punoo teoreettiset käsitteet, mittaustaidot ja laiterakentamisen yhteen kokonaisuuteen. Aiemmat tutkimukset osoittavat, että PBL-kurssit lisäävät opiskelijoiden motivaatiota, parantavat ilmiöiden syvällistä ymmärrystä ja kehittävät ongelmanratkaisua, kun projektit kytketään ajankohtaisiin ympäristö- tai teknologiakonteksteihin (Davis et al., 2017; Thomas, 2000).

Yksilevytietokoneeseen perustuva projekti (eng. *Single-board computer*, SBC) tarjoaa oppimisympäristön, jossa opiskelija joutuu kulkemaan koko insinööritieteellisen ketjun ideoinnista komponenttien hankintaan, laiterakennukseen ja mittaustulosten tulkintaan. Haastatteluaineisto osoittaa, että luentojen ja suunnittelun kautta opiskelijat oppivat systemaattista tavoitteiden asettamista. Kun taas oppiminen kehittävää itsetuntoa ja valmiuksia integroida useita STEM-aineita samaan projektiin. Onnistuneen laitteen esittely luokassa vahvistaa opiskelijan minä-pystyvyyttä. (Ambrož et al., 2023)

Yhdistämällä nämä kaksi lähestymistapaa, PBL:n moni-vaiheisen ongelmanratkaisun ja SBC-projektin teknisen kokonais-prosessin, syntyy oppimiskokonaisuus, jossa kemian teoria, instrumentaali-analytiikka ja kestävä kehityksen sovellus kietoutuvat saumattomasti toisiinsa. Opiskelijat suunnittelevat ja rakentavat punaisen LED-kolorimetrin, kalibroivat sen metyleenisinisen standardiliuoksilla ja seuraavat fotokatalyyttistä veden-puhdistusreaktiota reaaliajassa. Projektin lopputuloksena syntyy toimiva mittalaite, laboratoriopäiväkirja ja data-analyysi, jotka opiskelijat esittelevät vertaisilleen.

#### **4.1 Luokkahuone- ja LUMAlab Gadolin-toteutus**

Jotta väriainekokeen instrumentointi onnistuisi tiiviissä lukujärjestyksessä, opetusjakso on jaettu kahteen selkeään osaan: laiterakennus koululuokassa ja varsinainen fotokatalyyssikoe LUMAlab Gadolinissa opintovierailun yhteydessä. Tällä ratkaisulla maksimoidaan arvokkaan laboratorioajan hyöty ja minimoidaan koulun omissa tiloissa kuluva työaika, sillä koteloidun kolorimetrin rakentaminen ja koodin lataus voidaan puristaa enintään yhteen 90 minuutin oppituntiin, ja loput mittaukset suoritetaan vierailupäivänä ammattitasoisissa olosuhteissa.

Seuraavassa taulukossa on kompakti aikataulu (taulukko 6), jossa laitteiston rakentaminen ja ohjelmointi rajataan enintään 90 minuuttiin luokassa. Varsinainen fotokatalyyssikoe tehdään LUMAlab Gadolinissa opintovierailun aikana, jolloin koulupäivien tuntijaosta ei kulu useita kaksoistunteja laboratoriotyöhön.

**Taulukko 6.** Luokkahuonetoteutuksen aikataulu

| Vaihe                                | Tavoite ja toiminta                                                                                                                                                                                                                                                                             | Aika    |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1.Orientaatio (opettajan johdolla)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tutustutaan pdf-ohjeeseen “Fotokatalyyttinen vedenpuhdistus”</li> <li>- Pohditaan, miksi spektrofotometri puuttuu useista kouluista</li> <li>- Esitellään led-kolorimetrin periaate</li> </ul>                                                         | 45 min  |
| 2. Pikasuunnittelu ja työnjako       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ryhmät (3–4 hlö) luonnostelevat, miten kolorimetri rakennetaan.</li> <li>- Opettaja tukee kysymyksin ja tarkentavin vihjein.</li> </ul>                                                                                                                | 30 min  |
| 3.Rakentaminen + koodin lataus       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LED ja LDR painetaan pahvikoteloon, jalat läpi seinämän</li> <li>- Johdot yhdistetään valmiiksi merkattuun leipälautaan</li> <li>- Opettaja jakaa valmiin .ino-tiedoston</li> <li>- Ryhmät lataavat koodin ja mittaavat tyhjän referenssin.</li> </ul> | 60 min  |
| 4. Opintovierailu LUMALab Gadoliniin | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LUMALab Gadolinin henkilökunta ohjaa työpajan.</li> <li>- Ryhmät mittaavat omalla kolorimetrillä metyleenisinisen absorbanssin ja vertaavat tulosta spektrofotometriin.</li> </ul>                                                                     | 120 min |
| 5. Tulosten käsittely ja esitys      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Koulussa ryhmät esittävät löytönsä ja mittauksensa muille ryhmille.</li> </ul>                                                                                                                                                                         | 30 min  |

Riippuen siitä, kuinka paljon oppituntiaikaa on käytettävissä, opetuskokonaisuuteen on helppo tehdä joustoja. Jos luokassa on alle 90 minuuttia, opettaja voi esikoota pahvikotelot ja kiinnittää LED- ja LDR-komponentit valmiiksi. Tällöin oppilaille jää pelkästään osien painaminen leipälautaan, kaapelointi ja koodin lataus, mikä vie noin 45 minuuttia. Jos osa ryhmistä hallitsee Arduino-ohjelmoinnin perusteet, he voivat halutessaan kehittää koodia eteenpäin. Muut ryhmät voivat käyttää opettajan tarjoamaa valmista ja välittömästi käyttöön otettavaa versiota

Tämä joustava rakenne säilyttää projektioppimisen kokonaisen syklin: opiskelijat ideoivat, rakentavat, mittaavat ja analysoivat, vaikka varsinainen laboratoriotyö toteutetaan LUMALab Gadolinissa. Aikataulu on realistinen, koska koulun ei tarvitse varata omia laboratorioresursseja UV-lampuille ja suojakaapeille. Oppilaille motivaatio kasvaa, kun he pääsevät testaamaan itse rakentamaansa laitetta aidossa tutkimusympäristössä ja näkevät, miten oma ratkaisu vertautuu ammattilaisten spektrofotometriin.

## 5 Pohdinta ja johtopäätökset

Punaisella LEDillä toteutettu kolorimetri osoittautui tarkoituksenmukaiseksi korvaamaan puuttuvan spektrofotometrin koululaboratoriossa. Testijaksossa laite antoi lineaarisen vasteen metyleenisinisen standardiliuoksille ja saavutti  $R^2$ -arvon 0,998, joten Beer-Lambertin lain soveltaminen onnistui kvantitatiivisesti. Tulokset ovat linjassa aiempien tutkimusten kanssa, joissa Arduino-ohjatut LED-pohjaiset fotometrit ovat osoittautuneet riittävän tarkiksi opetuskäyttöön (Magro et al., 2020; Nhivekar et al., 2022). Rakennusvaiheen, kalibroinnin ja mittausten yhdistäminen samaan opetuskokonaisuuteen sitoi kemian teorian, elektroniikan ja ohjelmoinnin yhdeksi saumattomaksi oppimiskokemukseksi. Tämä on osoittautunut parantamaan oppilaiden ymmärtämistä absorbanssimittauksen epävarmuustekijöistä ja fotokatalyyzin mekanismista (Forbes & Nöthling, 2014). Opintovierailu LUMAlab Gadoliniin vahvistaa projektin autenttisuutta. Oppilaat pääsevät vertaamaan omaa laitettaan tutkimuslaboratorion spektrofotometriin.

Projektista tunnistettiin myös selkeitä rajoitteita. Yksikanavainen punainen LED sopii hyvin metyleenisiniselle, mutta muiden väriaineiden tutkiminen edellyttäisi valonlähteen ja detektorien vaihtamista. LEDin lämpeneminen muutaman minuutin käytön jälkeen nostaa valotehoa, mikä voi vääristää pitkäkestoisia mittauksia, ellei laitetta esilämmitetä. Serial Plotter-näkymässä Lux- ja absorbanssikäyrät piirtyvät samaan koordinaatistoon, jolloin pienen absorbanssin muutokset jäävät visuaalisesti piiloon; oppilaiden on osattava piilottaa Lux-viiva tarkkoja analysointeja varten. Tällaisten käyttöön liittyvien yksityiskohtien läpikäynti korostaa opettajan roolia prosessin ohjaajana, vaikka projekti etenee pääosin oppilaslähtöisesti.

Projektin potentiaali jatkokehitykselle on silti huomattava. Monikanavaisella LEDillä ja useammalla detektorilla laitteesta voidaan kehittää monipuolisempi fotometri, joka soveltuu laajemmalle väriainevalikoimalle. SD-korttipohjainen datankeruu poistaisi manuaalisen taulukointitarpeen ja vapauttaisi oppilaat keskittymään tulkintaan. Lisäksi pieni termistori LEDin vieressä mahdollistaisi automaattisen lämpötilakompensaation ohjelmassa, mikä parantaisi pitkäkestoisten mittausten tarkkuutta. Samankaltainen laitearkkitehtuuri voitaisiin myös soveltaa muihin kemian kursseihin, esimerkiksi akvaarioveden nitriitti- tai fosfaattipitoisuuden seurantaan väri-reaktioiden avulla, jolloin oppilaat saisivat jatkossa uusia konteksteja dataohjatulle oppimiselle.

Tätä kolorimetriprojektia ei ole vielä toteutettu oppilasryhmän kanssa, joten tulokset perustuvat mallinnukseen, laboratorio-esivalmisteluihin ja kirjallisuudessa raportoituun kokemustietoon. Suunnitelman analyysi osoittaa kuitenkin, että punaisen LEDin ja LDR-anturin varaan rakentuva laite on teknisesti toteuttamiskelpoinen ja kustannuksiltaan sopiva koulukäyttöön. Konsepti havainnollistaa, millä tavoin oppilaat voisivat yhden opetuskokonaisuuden aikana suunnitella, koota ja kalibroida mittalaitteen, jonka tuottama data riittää Beer-Lambertin lain mukaiseen kvantitatiiviseen analyysiin. Seuraava askel on pilotointi oikeassa luokka- ja laboratoriokontekstissa, jotta laitteiston käytettävyys, aikataulun realistisuus ja pedagoginen vaikuttavuus voidaan arvioida empiirisesti. Vasta tällainen kenttätesti vahvistaa, kuinka hyvin konsepti tukee oppilaiden motivaatiota, mittaustaitoja ja kemiallisen ajattelun syventämistä.

## Lähdeluettelo

- Ambrož, M., Perna, J., Haatainen, O., & Aksela, M. (2023). Promoting STEM Education of Future Chemistry Teachers with an Engineering Approach Involving Single-Board Computers. *Applied Sciences*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app13053278>
- Davis, E. J., Pauls, S., & Dick, J. (2017). Project-Based Learning in Undergraduate Environmental Chemistry Laboratory: Using EPA Methods To Guide Student Method Development for Pesticide Quantitation. *Journal of Chemical Education*, 94(4), 451–457. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00352>
- Docter, M. W., & Bastemeijer, J. (n.d.). *A Colorimeter as a Final Project for a Non-Major Electronic Instrumentation Course*.
- Forbes, P. B. C., & Nöthling, J. A. (2014). Shedding light on spectrophotometry: The SpecUP educational spectrophotometer. *South African Journal of Science*, 110(1/2), Article 1/2. <https://doi.org/10.1590/sajs.2014/20130096>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Magro, A., Silva, M., Sousa, G., Cardoso, F., Guimarães, G., Muniz, S., Sarnighausen, V., Fontes, M., Simões, R., Magro, A., Silva, M., Sousa, G., Cardoso, F., Guimarães, G., Muniz, S., Sarnighausen, V., Fontes, M., & Simões, R. (2020). Development of a low-cost colorimeter-like for undergraduate classes using microcontroller board and RGB LED. *Educación Química*, 31(1), 36–48. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.1.68349>
- Nhivekar, G. S., Jagdale, S. R., Kamble, S. B., Jadhav, B. T., Kamat, R. K., & Dongale, T. D. (2022). Versatile Three-in-One Single Beam Visible Colorimeter for Undergraduate Chemistry Laboratories. *Journal of Chemical Education*, 99(11), 3765–3772. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00372>
- O'Donoghue, J. (2019). Simplified Low-Cost Colorimetry for Education and Public Engagement. *Journal of Chemical Education*, 96(6), 1136–1142. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00301>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2013). Fundamentals of analytical chemistry, 9th ed., international ed. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(25), 7903–7904. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7242-1>
- Thomas, J. W. (2000). *A REVIEW OF RESEARCH ON PROJECT-BASED LEARNING*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-REVIEW-OF-RESEARCH-ON-PROJECT-BASED-LEARNING-Thomas/556a3e15b4cfe31588cff520206fcf764a413c25>

## Liitteet

### Liite 1. Arduino IDE-koodi

```
#include <math.h>

const int ledPin    = 13;    // LED
const int sensorPin = A4;    // anturi

const int nBlank     = 50;    // otoksia peruslinjaan
const int windowSize = 20;    // ikkunan koko vakautukseen
const int tolerance   = 2;    // sallittu vaihtelu Lux-yksiköissä
const int delayMs     = 50;    // viive mittausten välillä

float I0 = 0.0;    // peruslinja (blank)

float averageReading(int n) {
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        sum += analogRead(sensorPin);
        delay(2);
    }
    return sum / float(n);
}

void waitForYes(const char* msg) {
    Serial.print("# "); Serial.println(msg);
    Serial.println("# Kirjoita Y ja paina Enter");
    while (true) {
        if (Serial.available() > 0) {
            char c = Serial.read();
            if (c == 'Y' || c == 'y') {
                while (Serial.available() > 0) Serial.read();
                break;
            }
        }
    }
}

// mittaa jatkuvasti, kunnes 20 arvoa pysyy toleranssin sisällä
float getStableLux() {
    int buffer[windowSize];
    int idx = 0;
    while (true) {
        int raw = analogRead(sensorPin);
        buffer[idx] = raw;
        idx = (idx + 1) % windowSize;

        // laske min ja max ikkunassa
        int minVal = 1024, maxVal = 0;
        long sum = 0;
        for (int i = 0; i < windowSize; i++) {
            int v = buffer[i];
            if (v < minVal) minVal = v;
            if (v > maxVal) maxVal = v;
            sum += v;
        }
    }
}
```

```

float lux = sum / float(windowSize);
float abs = (I0 > 1e-3 && lux > 0) ? -log10(lux / I0) : 0.0;

// tulosta reaaliajassa
Serial.print(lux, 2);
Serial.print(',');
Serial.println(abs, 4);

if (maxVal - minVal <= tolerance) {
    return lux; // arvo vakaa, palataan
}
delay(delayMs);
}
}

void setup() {
    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // LED päälle

    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) { }

    Serial.println("Lux,Abs"); // Plotterin otsikko

    Serial.println("# Fotometri käynnissä.");
    Serial.println("# Poista kyvetti valopolulta.");

    waitForYes("Mittaa peruslinja nyt");

    // peruslinjan mittaus ja tulostus Abs=0
    for (int i = 0; i < nBlank; i++) {
        float lux = analogRead(sensorPin);
        Serial.print(lux, 2);
        Serial.println(",0");
        delay(delayMs);
    }
    I0 = averageReading(nBlank);
    Serial.print("# Peruslinjan Lux = ");
    Serial.println(I0, 2);
}

void loop() {
    waitForYes("Aseta kyvetti paikalleen, paina Y kun valmis");
    Serial.println("# Odotetaan lukeman tasaantumista...");

    float luxStable = getStableLux();
    float absStable = (I0 > 1e-3 && luxStable > 0) ? -log10(luxStable / I0) : 0.0;

    Serial.print("# Vakaa Lux = ");
    Serial.println(luxStable, 2);
    Serial.print("# Absorbanssi = ");
    Serial.println(absStable, 4);
    Serial.println("# -----");

    Serial.println("# Mittaa toinen näyte? (Y/N)");
    while (true) {
        if (Serial.available() > 0) {
            char c = Serial.read();

```

```
    if (c == 'Y' || c == 'y') {  
        while (Serial.available() > 0) Serial.read();  
        break; // uusi sykli, peruslinja säilyy  
    }  
    if (c == 'N' || c == 'n') {  
        Serial.println("# Mittaus päättyi.");  
        while (true) { } // pysäytä ohjelma  
    }  
}  
}  
}
```